

EVALUACIÓN DEL RIESGO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN
ESPACIOS DEPORTIVOS DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

MELISSA MONTOYA GARCÍA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS, INGENIERÍA ELÉCTRICA
PEREIRA, COLOMBIA
2019

EVALUACIÓN DEL RIESGO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN
ESPACIOS DEPORTIVOS DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

MELISSA MONTOYA GARCÍA

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERA ELECTRICISTA

DIRECTOR:
M.Sc. JORGE HUMBERTO SANZ ÁLZATE

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS, INGENIERÍA ELÉCTRICA
PEREIRA, COLOMBIA
2019

Nota de aceptación:

Firma del director del
programa

Firma del director del
proyecto

Firma del jurado

Pereira, Julio de 2019

RESUMEN

Esta tesis aborda el tema de descargas atmosféricas en campos abiertos, el cual hasta el momento ha sido poco estudiado. Tiene como finalidad poder establecer el nivel del riesgo en las zonas deportivas de la Universidad Tecnológica de Pereira que se encuentran al aire libre.

Inicialmente se crea una base de datos de los eventos registrados por descargas atmosféricas de los sistemas de protección y todos los eventos relacionados con el fenómeno, de la Empresa de Energía de Pereira desde el año 2008 hasta el 2018, con el propósito de crear un análisis cuantitativo y cualitativo del riesgo aplicando la norma internacional IEC 62305-2. Posteriormente se evalúa cada zona que se encuentra expuesta en el campus de la Universidad, teniendo en cuenta el entorno por la cual se encuentra rodeada y las dimensiones que posee cada área. Se tiene como finalidad poder concluir cual es el sistema de protección más efectivo según las características presentadas en las zonas estudiadas.

Palabras clave: Descargas atmosféricas, riesgo tolerable, sistema de aviso temprano, afectación a seres vivos, nivel del riesgo, campos abiertos.

ABSTRACT

This thesis deals with the subject of atmospheric discharges in open fields, which until now has been not studied in very detail. Its purpose is to establish the level of risk in the sports areas of the “Universidad tecnológica de Pereira”. Initially, a database of the events of atmospheric discharges of the protection systems and all events related to the phenomenon is created, this database belongs to “Empresa de Energía de Pereira” from 2008 to 2018, the purpose of doing it is to create a calculation analysis quantitative and qualitative risk by applying the international standard IEC 62305-2. Later, each zone that is exposed on the campus of the University is evaluated, taking into account the surrounding environment and the dimensions of each area. The purpose is to conclude which is the most effective protection system according to the characteristics in the studied areas.

Keywords: Atmospheric discharges, tolerable risk, early warning system, affectation to living beings, risk level, open fields

OBJETIVO GENERAL

Realizar la Evaluación del nivel del Riesgo por descargas atmosféricas en los espacios deportivos a campo abierto de la Universidad Tecnológica de Pereira.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la evaluación del riesgo aplicando la norma “IEC TR 62713 Safety procedures for reduction of risk outside a structure” y la norma IEC 62305-2, en los espacios deportivos de la Universidad Tecnológica de Pereira.
- Considerar las disposiciones geográficas y climáticas de la región que impactan el área de estudio.
- Analizar los sistemas y metodologías disponibles para la protección de descargas atmosféricas en áreas no cubiertas.
- Seleccionar el sistema de protección y/o detección de descargas atmosféricas que más se ajuste a las necesidades que se presentan en las áreas a evaluar

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	5
OBJETIVO GENERAL	7
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
TABLA DE CONTENIDO	9
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE TABLAS	14
1.INTRODUCCIÓN	15
2. TORMENTAS ELÉCTRICAS	16
2.1 TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	16
2.1.1 Descargas nube y tierra.....	16
2.1.2. Formación y evolución de las tormentas atmosféricas	18
2.1.3. Medición de la actividad atmosférica	20
2.2 EL TRUENO	23
2.3 NIVEL CERÁUNICO	23
2.4 CORRIENTE ELÉCTRICA EN EL CUERPO HUMANO	24
2.4.1 Tipos de contacto con la corriente eléctrica.....	25
2.5 INCIDENCIAS DE MUERTES EN EL MUNDO	28
2.5.1 Incidencias de muertes en América Latina	30
2.5.2 Incidencia de muertes en Colombia.....	31

3 MÉTODOS PARA PREVENCIÓN Y DETECCIÓN DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	34
3.1 SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO (SPE)	34
3.1.2 Función del Sistema de Protección Externo	34
3.1.3 Sistema de Captación.....	35
3.1.4 Sistema de Pararrayos	35
3.1.5 Protección con Sistema Franklin	36
3.1.6 Protección Pararrayos PDC.....	36
3.1.7 Principio de Protección con un Sistema Tipo Jaula de Faraday	37
3.1.8 Varillas Tipo Franklin (Bayonetas)	38
3.1.9 Cables Colgantes	38
3.1.10 Malla de Conductores.....	38
3.1.11 Sistema de Bajantes.....	39
3.1.12 Sistema de Puesta a Tierra – SPT	41
3.1.13 Terminal de tierra.....	42
4 SISTEMAS DE ALARMA DE TORMENTAS (SAT)	44
4.1 CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DE LOS DETECTORES DE TORMENTAS	44
4.2 REDES DE LOCALIZACIÓN DE RAYOS EN COLOMBIA.....	46
5 RECOPIACION DE ESTADÍSTICAS E INFORMACIÓN	50
5.1 ESTADÍSTICAS PARA COLOMBIA	50
5.2. ESTADÍSTICAS PARA PEREIRA RISARALDA	53
5.2.1 Relación por año de las descargas atmosféricas detectadas.....	54
5.3. AFECTACIONES REGISTRADAS EN LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA.....	58
5.4 CALCULO DEL RIESGO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN	

CAMPOS ABIERTOS DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA	59
6 ANÁLISIS DE RIESGO PARA LOS CAMPOS DEPORTIVOS DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA	62
6.1 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS ZONAS DEPORTIVAS EN LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA	62
6.2.1 Cancha de césped natural.....	63
6.2.2 Cancha de Tenis y muro de Tenis.....	64
6.2.3 Canchas de fútbol sintética.....	65
6.2.4 Cancha de Volley Arena.....	66
6.2.5 Piscinas Semiolímpicas	67
6.2.6 Canchas de fútbol sala	68
6.2.7 Zonas de entrenamiento al aire libre	70
6.2 ANÁLISIS DEL RIESGO PARA CADA ZONA DEPORTIVA	71
6.2.1 Caso: Cancha principal de Futbol.....	71
6.2.3 Caso: Cancha de Tenis	72
6.2.4 Caso: Cancha de Futbol sintética	73
6.2.5 Caso: Cancha de Volley Arena.....	74
6.2.6 Caso: Piscinas Semi-olímpicas.....	76
6.2.7 Caso: Canchas de futbol sala	77
6.2.8 Caso: Zonas de entrenamiento al aire libre	78
7 SISTEMA MÁS ÓPTIMO A IMPLEMENTAR	81
7.1 NORMATIVA: IEC 62793 - 2016	83
7.1.1 Métodos de alarma	84
8 CONCLUSIONES	86
9 BIBLIOGRAFÍA	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de descargas atmosféricas eléctricas entre nube y tierra [6].	17
Figura 2. Distribución típica de cargas en las nubes y en la tierra [7].	19
Figura 3. Ciclo de vida de las tormentas eléctricas [9].	21
Figura 4. Mapa Isoceráunico [11].	24
Figura 5. Representación de la tensión de contacto [13].	26
Figura 6. Representación del impacto directo del rayo sobre un ser humano [13].	26
Figura 7. Representación del impacto indirecto de un rayo [13].	27
Figura 8. Representación de la tensión de paso [13].	27
Figura 9. Traumatismo o fuego [13].	28
Figura 10. Mapa de densidad de rayos para Colombia, 2012 [15].	32
Figura 11. Protección Pararrayos PDC [24].	37
Figura 12. Zona de Protección por jaula de Faraday [18].	38
Figura 13. Red Colombiana de medición y localización de descargas atmosféricas RECMA [13].	47
Figura 14 Sistema de Información de Descargas Atmosféricas (SID) [13].	48
Figura 15 Red de localización y detección de rayos LINET [13].	49
Figura 16. Mapa de muertes por descargas atmosféricas por departamento en Colombia [20].	50
Figura 17. Lesiones y muertes por rayos en Colombia 2010-2013 [3].	53
Figura 18 Porcentaje de descargas atmosféricas detectadas entre los años 2008-2018, para la ciudad de Pereira, UTP y su zona veredal, fuente del autor. Fuente: del autor.	54
Figura 19. Descargas atmosféricas rurales y urbanas en la ciudad de Pereira. Fuente: del autor.	56
Figura 20. Tormentas eléctricas en Pereira (Según EEP). Fuente: del autor.	57
Figura 21. Tormentas eléctricas en Pereira (Según IDEAM) [25].	57
Figura 22. Tormentas Eléctricas registradas por mes para la UTP. Fuente: del autor.	59
Figura 23. Perímetro Universidad Tecnológica de Pereira [26].	62
Figura 24. Área aproximada cancha de césped, imagen obtenida de google maps.	63
Figura 25. Área aproximada descubierta que rodea la cancha de césped, imagen obtenida de google maps.	63
Figura 26. Área aproxima de la cancha de tenis, imagen obtenida de google maps.	

.....	64
Figura 27. Área aproximada descubierta que rodea la cancha, imagen obtenida de google maps.....	64
Figura 28. Área de la cancha sintética, imagen obtenida de google maps.	65
Figura 29. Área aproximada descubierta que rodea la cancha de tenis, imagen obtenida de google maps.....	65
Figura 30. Área cancha Volley Arena, imagen obtenida de google maps.....	66
Figura 31. Área aproximada descubierta que rodea la cancha de Volley Arena, imagen obtenida de google maps.	66
Figura 32. Área de las piscinas, imagen obtenida de google maps.	67
Figura 33. Área aproximada descubierta que rodea las piscinas, imagen obtenida de google maps.	67
Figura 34. Área de la cancha de fútbol sala #1, imagen obtenida de google maps.	68
Figura 35. Área aproximada descubierta que rodea la cancha de fútbol sala #1, imagen obtenida de google maps.	68
Figura 36. Área de la cancha de fútbol sala #2, imagen obtenida de google maps.	69
Figura 37. Área aproximada descubierta que rodea la cancha de fútbol sala #1, imagen obtenida de google maps.	69
Figura 38. Área aproximada zona de entrenamiento al aire libre, imagen obtenida de google maps.	70
Figura 39. Área aproximada descubierta que rodea la zona de entrenamiento, imagen obtenida de google maps.	70
Figura 40. Fases De La Tormenta [22].....	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Densidad de descargas a tierra para las principales ciudades de Colombia [15].	33
Tabla 2 Técnicas de detección de tormentas eléctricas y algunas de sus características [13].	46
Tabla 3. Número de muertes por descargas atmosféricas por departamento [20].	51
Tabla 4. Descargas atmosféricas registradas en diciembre de 2018. Fuente: del autor.	55
Tabla 5. Afectaciones de descargas atmosféricas por año en la Universidad Tecnológica de Pereira. Fuente: del autor.	55
Tabla 6. Eventos reportados por mes durante los últimos 10 años con incidencia sobre el campus de la universidad y sus alrededores. Fuente: del autor	59
Tabla 7. Factor de localización C_d	60
Tabla 8. Valores de P_1	61
Tabla 9. Variables para calcular el riesgo para cancha principal de fútbol	72
Tabla 10. Variables para calcular el riesgo para cancha principal de Tenis	73
Tabla 11. Variables para calcular el riesgo para cancha de futbol sintética.	74
Tabla 12. Variables para calcular el riesgo para cancha de Volley Arena.	75
Tabla 13. Variables para calcular el riesgo para las piscinas semiolímpicas.	76
Tabla 14. Variables para calcular el riesgo para la cancha de fútbol sala #1.	77
Tabla 15. Variables para calcular el riesgo para la cancha de fútbol sala #2	78
Tabla 16. Variables para calcular el riesgo para zonas de entrenamiento al aire libre.	79
Tabla 17. Recomendaciones norma NTC 4552 según el riesgo [11].	81

1 INTRODUCCIÓN

Las descargas atmosféricas son uno de los fenómenos más destructivos de la naturaleza que suponen un grave peligro para las personas, animales, edificios y equipos, produciendo severas consecuencias que van desde pérdidas económicas hasta pérdidas de la vida humana [1]. El territorio colombiano se encuentra ubicado en alrededores de convergencia intertropical donde su formación geográfica distintiva de llanuras y largas cadenas montañosas, hacen de este país una de las regiones con mayor actividad de descargas atmosféricas en el mundo [2]. El rayo es un fenómeno meteorológico de origen natural, cuyos parámetros son variables en espacial y temporalmente. La mayor incidencia de rayos en el mundo se da en las tres zonas de mayor convección profunda: América tropical, África central y norte de Australia.

Colombia, por estar situada en la zona de influencia intertropical, presenta una de las mayores actividades de rayos del planeta; de allí la importancia de la protección contra dicho fenómeno, pues si bien los métodos de apantallamiento y protección desarrollados a nivel mundial se pueden aplicar, algunos parámetros del rayo son particulares para esta zona [1].

Observaciones realizadas a nivel mundial indican que sobre esta zona se presenta la mayor actividad de rayos en el mundo, siendo Colombia uno de los países con los más altos índices de densidad de rayos, situación que es comprobada por los índices de mortalidad a causa de este fenómeno que están en aumento. La falta de protección en campos abiertos ha dejado al azar la vida de las personas que se encuentran realizando diferentes actividades al aire libre.

Los rayos o descargas eléctricas directas o por transferencia, causan un promedio de 7000 muertos y más de 15000 heridos anualmente en el mundo, según estadísticas. La mayoría de los decesos y heridos a causa de rayos ocurren cuando las personas se encuentran en espacios exteriores durante los meses de verano entre el mediodía y el atardecer, y sobre todo en días de lluvia o tormentas eléctricas.

2 TORMENTAS ELÉCTRICAS

Las tormentas se basan en la confluencia de condiciones meteorológicas locales mediante procesos físicos que implican gradientes de temperatura, presión, humedad, precipitación y las condiciones de inestabilidad atmosférica. Su clasificación comúnmente se agrupa en tormentas de origen convectivo o térmicas y de origen ciclónico o frontal [3].

Su naturaleza es creada por las nubes convectivas que son aquellas donde en su seno se desarrollan fuertes corrientes ascendentes y descendentes, por lo tanto, estas nubes suelen desarrollar tormentas, rayos y gran cantidad de descargas eléctricas. Este fenómeno es producido debido a los cambios de temperatura, humedad y presión sobre la superficie terrestre y estos cambios a su vez son generados por la exposición directa de la tierra a los rayos del sol. Las características del relieve influyen en gran medida en la formación de este tipo de tormenta, donde suelen iniciarse sobre regiones montañosas [4].

2.1 TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Se tienen descargas atmosféricas de origen volcánico, tormentas volcánicas, tormentas de polvo, tormentas de nieve y la del interés de la presente investigación, las cuales son formadas por nubes cumulonimbus [5].

La descarga atmosférica conocida como rayo, es la igualación violenta de cargas de un campo eléctrico que se ha creado entre una nube y tierra o, entre nubes.

2.1.1 Descargas nube y tierra

Inicialmente las descargas eléctricas que tienen contacto a tierra se conocen como descargas a tierra y se dividen en 4 tipos: 2 iniciadas en las nubes, y 2 iniciadas en tierra, pueden ser positivas o negativas dependiendo de la polaridad de la carga en la tierra y su punto de inicio. Los más comunes, siendo el 90% de los rayos detectados, son desde una nube negativa hacia la tierra.

En el estudio y cálculo de sobretensiones, un rayo puede ser visto como una fuente de corriente que puede tener polaridad tanto como positiva, negativa o ambas en una misma descarga, lo que se conoce como onda bipolar. En general, se han identificado cuatro tipos de rayo entre nube y tierra. Las descargas negativas forman el 90 % de las descargas que caen a tierra a lo largo de todo el planeta (categoría

1); menos del 10 % de las descargas son positivas (categoría 3). También existen descargas iniciadas desde tierra hasta la nube (categorías 2 y 4), sin embargo, estas descargas son relativamente raras y ocurren normalmente en zonas de gran altitud, desde los picos de las montañas o desde altas estructuras construidas por el hombre. Un aspecto adicional que se debe tener en cuenta es la distorsión que la presencia de objetos altos puede provocar en los parámetros de un rayo respecto al que se originaría en terreno plano. En la figura 1 se pueden ver las diferencias entre las cuatro categorías comentadas [6].

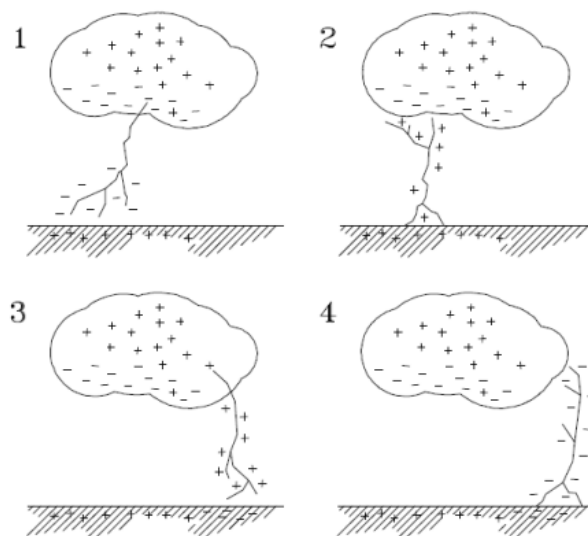


Figura 1. Tipos de descargas atmosféricas eléctricas entre nube y tierra [6].

Las descargas entre las nubes se dividen en tres categorías:

1. Dentro de una misma nube (intranube), Intra-Cloud (IC) en inglés:
Se produce entre el centro de las cargas opuestas dentro de la misma nube.
2. Entre una nube y otra (internube), Cloud-to-Cloud (CC) en inglés:
Se da entre centros de descarga de diferentes nubes.
3. Entre nube y aire:
Es un tipo de rayo que se caracteriza por tener menos potencia que el rayo tipo nube-tierra, siendo únicamente una descarga la necesaria para que la

potencia en los dos puntos sea idéntica. Es por ello por lo que lo frecuente es observar muy pocos fogonazos en la misma trayectoria.

2.1.2 Formación y evolución de las tormentas atmosféricas

La mayoría de los rayos nube-tierra se inician por el fuerte campo eléctrico que existe en la carga positiva situada debajo de la nube y la carga negativa de la base de la nube. Una vez que la nube de tormenta se ha cargado hasta el punto en que el campo eléctrico excede la rigidez dieléctrica local de la atmosfera, el resultado es la iniciación de una descarga eléctrica atmosférica o rayo.

En ese instante, el campo eléctrico es del orden de un millón de voltios por metro; en menos de un segundo, el rayo transportara la carga correspondiente a 1020 electrones y proporcionara una potencia eléctrica equivalente a 100 millones de bombillas de alumbrado residencial. Durante esa fracción de segundo, la energía electrostática de la carga acumulada pasa a energía electromagnética, energía acústica y finalmente, calor [1].

Las descargas atmosféricas son el resultado del intento de la naturaleza por mantener un equilibrio dinámico entre las cargas positivas de la ionosfera y las cargas negativas de la tierra, que conllevan a un proceso de desarrollo marcado por tres etapas: formación, madurez y disipación.

La fase de formación de las tormentas convectivas o de origen térmico, se presenta principalmente por las condiciones de temperatura y humedad que adquiere la superficie terrestre en gran parte del día, debido a la exposición directa a los rayos del sol y en conjunto con las masas de aire cálido y húmedo provenientes de zonas costeras al igual que las ráfagas frías descendentes de la alta montaña que alimentan el estado de cumulo de la nube [3].

Las colisiones formadas entre partículas de granizo y cristales de hielo y la organización de estas cargas separadas de diferentes tamaños, hacen que el agua o hielo que contienen no pueda ser sostenido por las corrientes ascendentes y comiencen a precipitarse. Aunque la cantidad y la polaridad de la carga transferida durante estos choques dependen de la temperatura y otros factores, en la mayoría de las tormentas, el proceso de separación de carga lleva a un arreglo simple de carga tripolar, con carga positiva en la parte superior de la nube, una capa o región

de carga negativa en la parte media de la nube y una pequeña parte de carga positiva en la parte baja de la nube [5].

La madurez se desarrolla al encontrarse las cargas eléctricas de la nube distribuidas de forma no homogénea y en concentraciones desiguales de carga, una vez sobrepasado el valor crítico se producen pequeñas descargas dentro de la nube. Generalmente, los rayos nube-tierra se generan después de los rayos intranubes, con tiempos de retraso que van desde unos pocos minutos hasta más de una hora dependiendo del tipo de tormenta, y se asocian a la fase más madura del ciclo de vida de la tormenta (Figura 2). Sin embargo, dependiendo de la ubicación geográfica, hasta una cuarta parte de las tormentas generan rayos nube-tierra como primera descarga [7].

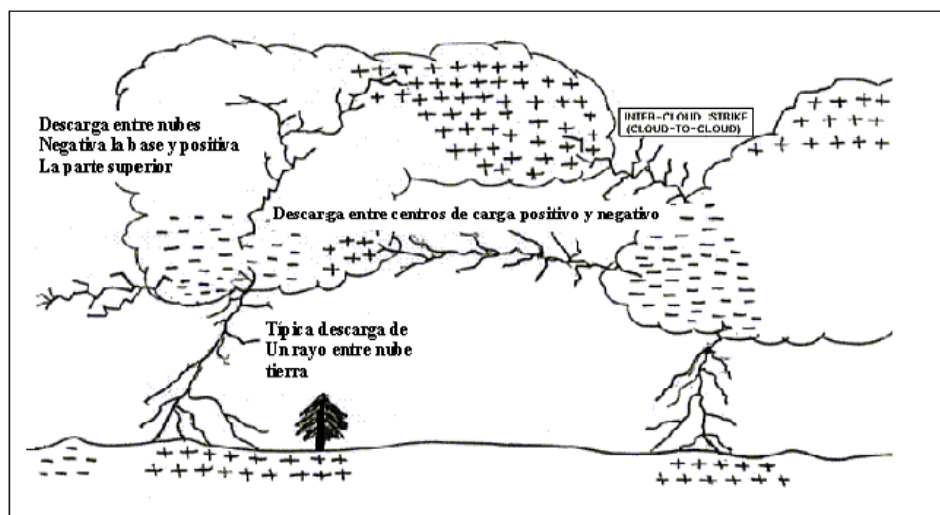


Figura 2. Distribución típica de cargas en las nubes y en la tierra [7].

La etapa final del ciclo de la tormenta incluye parte de la fase de maduración, en donde la tasa de rayos nube-tierra e intranube alcanza valores máximos, finalmente se llega a la fase de disipación, cuya tasa de rayos por minuto disminuye rápidamente y eventualmente cesa. Durante la etapa de disipación la carga no está separada activamente, pero pueden aun existir regiones electrificadas en la nube [7].

2.1.3 Medición de la actividad atmosférica

La medición del campo eléctrico atmosférico es la contabilización de las variables relacionadas con la actividad eléctrica y el cambio climático, donde se producen alteraciones a las variables ambientales, el campo eléctrico ambiental, la corriente, cambios de presión, formación de ondas de choque, cambios en intensidad lumínica y alteración del campo radioeléctrico entre otras. Debido a esto nace de la necesidad de conocer e implementar diferentes dispositivos capaces de asociar y registrar en gran medida el comportamiento de la actividad atmosférica y de esta forma emprender un extenso trabajo en la caracterización de sus parámetros [8].

Un sistema de detección de descargas consiste en un grupo de sensores o estaciones de medida ubicadas en un área de estudio que permiten la caracterización de los parámetros físicos del fenómeno del rayo, por medio de una gama de sensores con resoluciones de LF/VLF, y VHF.

Acorde con el estándar de la Unión Europea EN50536 “Protection Against Lightning”, los sistemas de medición se pueden clasificar acorde con los eventos detectados en los ciclos de vida en cuatro fases diferentes:

- Periodo I: Todo el ciclo de vida de la tormenta
- Periodo II: Actividad total de Rayos (Nube Tierra, Nube Nube)
- Periodo III: Solo detectan Rayos Nube Tierra.
- Periodo IV: Rayos Nube Tierra y otras fuentes Electromagnéticas.

En la figura 3 se evidencia las características que se presentan en cada etapa o periodo del ciclo de vida de la tormenta, que pueden ser parametrizados de la siguiente manera:

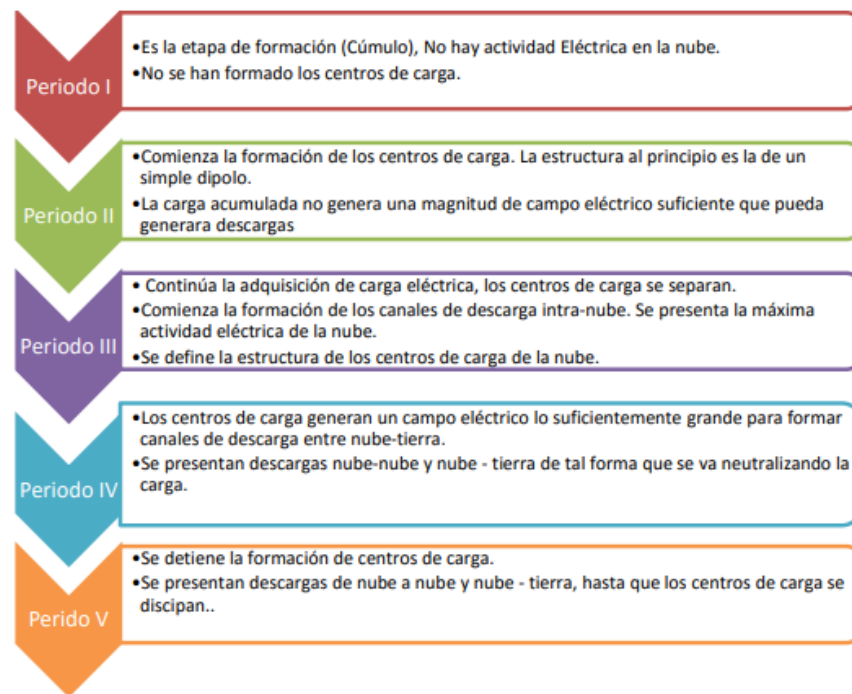


Figura 3. Ciclo de vida de las tormentas eléctricas [9].

Algunos de los cambios detectables ante cualquier dispositivo son:

- **Campo Eléctrico:** Durante el rayo ocurren cambios en los centros de carga de la nube, esto hace que existan cambios en el campo eléctrico ambiental. Estos cambios pueden ser detectados mediante el uso de sensores de campo eléctrico como los EFM (Electric Field Mill) los cuales tienen un rango de detección de algunos kilómetros [9].

- **Campo Magnético:** Durante la descarga ocurre una transferencia de carga y por lo tanto movimiento de portadores de carga eléctrica, esto hace que exista una corriente equivalente por los canales de propagación los cuales generan campos magnéticos variables, los cuales pueden ser detectados mediante sensores de campo magnético como las antenas MDF (Magnetic Direction Finding) [9].

- **Radiación Espectro Radio Eléctrico:** Debido a las razones dadas para el campo magnético, se produce además aceleración y desaceleración de cargas eléctricas, esto produce fenómenos de radiación electromagnética principalmente en las bandas de LF/VLF/VHF del espectro radioeléctrico. Este tipo de radiación puede ser detectable mediante antenas, al igual que las emisiones de estaciones de radio,

éstas son detectables en un rango de distancias más amplio que las demás variables ya que pueden cubrir varios cientos de kilómetros [9].

- **Radiación Espectro Visible:** Durante la formación del líder de propagación y la descarga de retorno se eleva la temperatura alrededor de la ruta del canal, esto crea un destello visible conocido como relámpago, sin embargo el uso de este tipo de observación debe hacerse a cortas distancias, la propagación de la luz en el aire depende de las condiciones climáticas, por tanto este tipo de observación ha sido usada para capturar, por ejemplo, mediante el uso de cámaras de alta velocidad, los procesos de formación del rayo y las características geométricas como las ramificaciones y tortuosidad [9].

- **Radiación de Alta Energía:** Durante la generación del líder escalonado (ver sección 1.3.2) se presentan partículas con carga acelerada que pueden presentar radiación de alta energía como los Rayos X. Adicionalmente también se presentan partículas fugitivas las cuales generan incluso radiación, sin embargo, este tipo de radiación es disipada por el aire en distancias relativamente cortas [9].

- **Onda de Choque:** Ocurre con la diferencia de presión presentada al calentarse el aire alrededor del canal de conducción formando una onda de choque conocida como trueno [9].

la detección de estas variables debidas al rayo se ha realizado por medio observaciones con sensores a nivel del suelo, a nivel atmosférico o incluso con el uso de satélites. De acuerdo con su nivel respecto a la superficie terrestre, estos sensores fueron clasificados en superficiales y atmosféricos. Son incontables los medios que se han utilizado para medir las corrientes y tensiones de los rayos, desde los usados entre 1910 y 1930 como el klidonógrafo, el oscilógrafo, la cámara de Boys, los medidores de corriente de cresta (magnetic links), hasta los sofisticados equipos utilizados en el proyecto Francé del Massif Central de producción y medición de rayos "artificiales". Allí se emplean magnetic links, registradores de campo eléctrico y magnético, cada uno con varios osciloscopios y equipo fotográfico integrado; goniómetro para localizar relámpagos; contadores CIGRE de relámpagos; medidores del campo de la tierra (field mills y radioactive probe electrometer) y equipo fotográfico y acústico [10].

2.2 EL TRUENO

El trueno es la señal acústica generada por un canal de aire caliente que se expande rápidamente. De él, se puede extraer información sobre la localización, tamaño y orientación del rayo. Una teoría aceptada del trueno y sus principales rasgos sólo existe desde hace unos 25 años. El aire en el canal de la descarga se calienta y se expande en forma de una onda de choque. Posteriormente, esta onda se vuelve energía acústica produciéndose el trueno. Cada componente del rayo: el líder escalonado, los líderes rápidos, las descargas de retorno, contribuyen al trueno. Los componentes más energéticos producen las frecuencias más bajas del sonido. Estas frecuencias bajas se atenúan menos que las altas, ya que la atenuación es proporcional al cuadrado de la frecuencia, por ello, un rayo no muy energético puede no oírse ya a diez kilómetros.

El estudio del trueno ha perfeccionado los conocimientos que ya se tenían sobre el rayo, y constituye un elemento fundamental para el estudio de las descargas entre las nubes y del canal de las descargas en el interior de una nube donde los medios visuales no pueden suministrar información [10].

2.3 NIVEL CERÁUNICO

Se le conoce con este nombre a la cantidad de tormentas eléctricas (en las que se escuchan truenos) que hay en un año en una determinada zona. Los niveles isoceráunicos se suelen llevar a mapas isoceráunicos, es decir, a mapas con curvas de igual nivel ceráunico. Tal y como se evidencia en la siguiente imagen, dependiendo la zona de ubicación geográfica, se tienen unas líneas con diferentes valores, que son llamadas líneas Isoceráunicas, que determinan geográficamente las zonas de más o menos riesgo de actividad de rayos.

Cada línea isoceráunica tiene un valor que es el resultado de la aparición de días de tormentas por año.

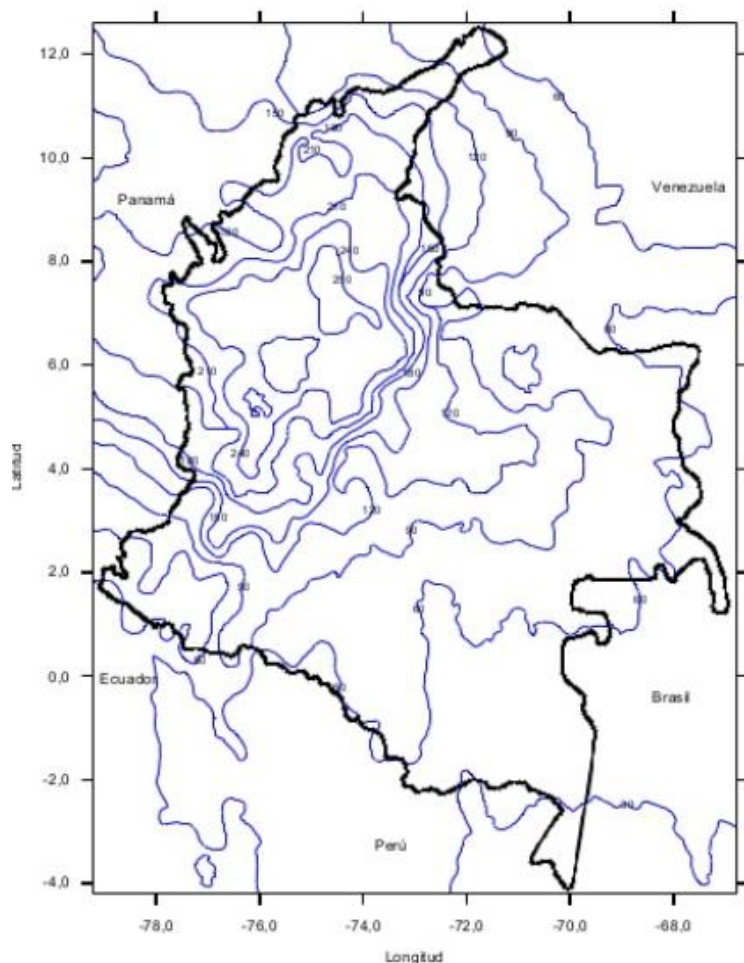


Figura 4. Mapa Isoceráunico [11].

Los datos de los mapas ceráunicos cambian de valor según cambia el comportamiento de las tormentas, pero se ha tomado que los datos acumulados por gran cantidad de tiempo de estudio y registro van mostrando una regularidad en el comportamiento ceráunico, que ayuda a la toma de decisiones para la protección contra descargas atmosféricas.

2.4 CORRIENTE ELÉCTRICA EN EL CUERPO HUMANO

Las consecuencias de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano van desde lesiones físicas secundarias hasta la muerte por fibrilación ventricular. Sin embargo, los flameos externos (entre la cabeza y los pies) que se producen alrededor del cuerpo pueden causar más daños que muerte [1]. En las lesiones por rayos los paros respiratorios y cardíacos, espasmos vasculares, daños neurológicos e

inestabilidad son las principales consecuencias, mientras que las quemaduras internas son raras en este tipo de accidentes. Algunas investigaciones muestran que la rata de mortalidad varía entre 8 y 10 personas muertas por cada 100 personas impactadas por lo rayos [12].

Este tipo de lesiones se caracterizan usualmente, por incluir las siguientes afectaciones:

- a) **Quemaduras:** quemaduras repentinas, desvanecimiento, eritema, rayas lineales, piel puntuada de grosor total y pérdida de miembros por contacto del metal.
- b) **Corazón:** paro cardíaco, fibrilación ventricular, daño cardíaco e hipertensión.
- c) **Cerebro:** fallas del sistema nervioso central, daño cerebral, parálisis, inconsciencia, amnesia y cambios de personalidad.
- d) **Sistema respiratorio:** paro respiratorio, broncoespasmo, edema pulmonar y apnea.
- e) **Sistema musculoesquelético:** parálisis, contusiones, laceraciones, fracturas de huesos y dolores crónicos.
- f) **Ojos:** quemaduras repentinas en la córnea, hemorragia vítrea, desgarro retiniano, punción macular, retina, desprendimiento y nistagmo.
- g) **Orejas:** barotrauma, rotura de la membrana timpánica, sordera, otorrea y ataxia.

2.4.1 Tipos de contacto con la corriente eléctrica

Algunas de las formas en las que un rayo puede lesionar o acabar con la vida de una persona se describen a continuación.

- **Tensión de Contacto**

Ocurre cuando la persona entra en contacto físico con un objeto que es impactado por un rayo, esto produce una diferencia de tensión entre el punto de contacto y tierra; por lo que la corriente del rayo puede fluir a través de la persona en el punto de contacto [13]. (Figura 5.).



Figura 5. Representación de la tensión de contacto [13].

- **Impacto Directo**

Se produce cuando un rayo conecta directamente a la víctima. Esto es más probable a campo abierto cuando la persona se encuentra a la intemperie sin la posibilidad de llegar a la seguridad de una edificación, por ejemplo, las personas que cumplen labores agrícolas o soldados en operaciones militares. Algunas investigaciones han estimado que la variación de muertes cuando una persona es impactada directamente se encuentra entre el 30% y el 90% [13] (Figura 6.).



Figura 6. Representación del impacto directo del rayo sobre un ser humano [13].

- **Descarga Lateral desde otro Objeto o impacto indirecto**

Esto ocurre cuando una persona está cerca de un objeto que es impactado por un rayo y, al bajar por este objeto puede saltar hacia una persona. Se da cuando una posible víctima está cerca del potencial de tierra [13] (Figura 7.).

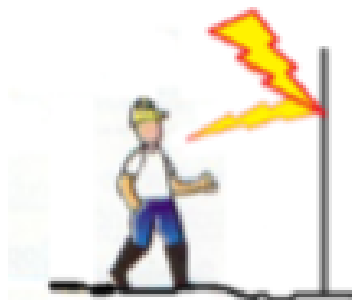


Figura 7. Representación del impacto indirecto de un rayo [13].

- **Tensión de Paso**

También conocido como diferencia de potencial en tierra (EPR), se debe a que la tierra no es un conductor perfecto. Cuando la corriente del rayo se inyecta en la tierra, se desplaza a través de esta como en cualquier otro conductor. En la actualidad se sabe que, aún en condiciones de resistencia alta de una persona y tierra, la energía absorbida por el cuerpo humano, debido a las tensiones de paso es solo una fracción de la energía considerada peligrosa. Sin embargo, no siempre que corriente de rayo que alcanza la tierra se dispersa uniformemente, sino fluye sobre la superficie de la tierra; cuando una persona se encuentra en el camino de ese flujo puede sufrir quemaduras y parálisis [13] (Figura 8.).



Figura 8. Representación de la tensión de paso [13].

- **Traumatismo o Fuego**

Por otra parte, las personas pueden sufrir lesiones (no eléctricas) A) al estar cerca de la fuerza de choque de la onda producida por una descarga cercana, o B) la onda de tierra u otro mecanismo induce contracciones musculares intensas que puede

lanzar la víctima hasta decenas de metros de distancia. Una persona puede sufrir de fuerzas explosivas e implosivas debido a truenos, provocándole contusiones y lesiones por presión, incluida la ruptura de la membrana timpánica. Otro mecanismo de lesión es por objetos contundentes, cuando metralla o residuos producto del impacto del rayo contra la edificación producen lesiones personales [13] (Figura 9.).

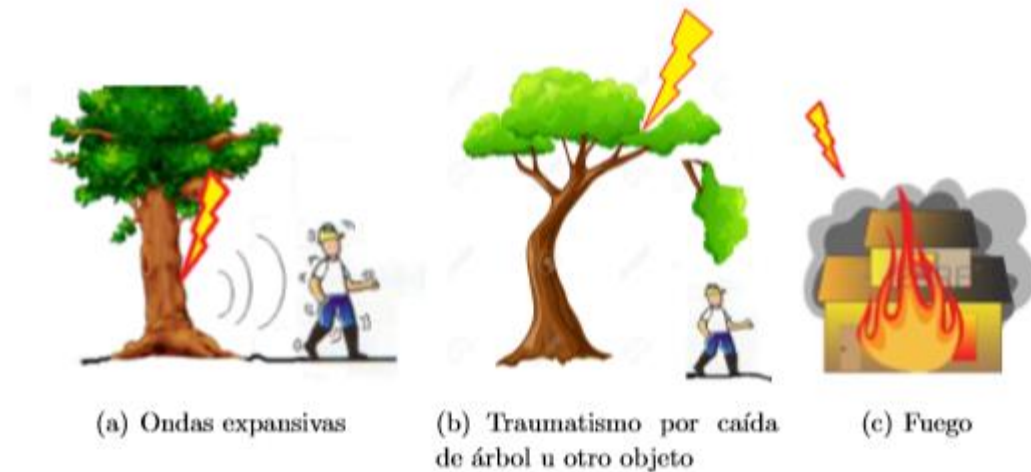


Figura 9. Traumatismo o fuego [13].

- **Inducción**

Los impactos a tierra a distancias entre 25 y 3000 metros generalmente inducen más de 1000 voltios sobre conductores aéreos. Este fenómeno es peligroso para un ser humano; por ello se recomienda alejarse de las líneas eléctricas, cables aéreos, cercas ganaderas, mallas eslabonadas, vías de ferrocarril y tendederos de ropa [13].

2.5 INCIDENCIAS DE MUERTES EN EL MUNDO

Actualmente el calentamiento de la tierra por el efecto invernadero provoca el aumento de tormentas eléctricas, en especial en los países tropicales, con las consecuentes pérdidas de vidas humanas y económicas, advirtió el experto brasileño Osman Pinto Junior, coordinador del Grupo de Electricidad Atmosférica (ELAT) del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales. El experto explicó que la cantidad de rayos en el mundo se duplicará en este siglo si la temperatura del planeta se eleva en cuatro o cinco grados como se ha estimado.

En los Estados Unidos de Norteamérica, se producen unas 80 muertes anuales por

rayos. La tasa de mortalidad es más elevada en los grupos de edades entre 10 a 20 años y es siete veces mayor en masculinos. Los casos ocurren con mayor frecuencia en lugares lluviosos y durante el verano, posiblemente debido al incremento de las actividades fuera de la casa durante tormentas eléctricas. La mayoría de las muertes suceden en personas durante excursiones a campo traviesa durante tormentas eléctricas. Trabajadores del campo y excursionistas están en alto riesgo.

Más de 100 rayos golpean la Tierra cada segundo, según estiman los expertos, y más del 70% de ellos caen en regiones tropicales o subtropicales.

"El mundo subdesarrollado es donde se encuentra la máxima frecuencia de rayos y tormentas eléctricas, en lugares como República Centroafricana y República Democrática del Congo, la región amazónica de América de Sur, las islas de Indonesia y Borneo en el Sudeste Asiático" [20].

En España, cada año mueren de 10 a 15 personas a causa de los rayos. La mortalidad en Francia se eleva a 15 o 20 personas, y en Estados Unidos alcanza los 60 muertos. Según las estimaciones del Gobierno de Bangladesh, al menos 203 personas murieron en el año 2016 pasado a causa de los rayos, 82 de las cuales fallecieron en un solo día en el mes de mayo de 2016.

Unas de las catástrofes causadas por rayos donde se tienen el mayor número de personas afectadas son:

- En Grecia, en 1856, un rayo cayó en un depósito de pólvora. Murieron 400 personas.
- En 1927, en EE. UU. un depósito de municiones estalló al caer un rayo, provocando 30 muertos.
- En 1963, también en EE. UU. el depósito de keroseno de un avión en vuelo fue alcanzado por un rayo. Los 86 ocupantes murieron.
- El número más elevado de víctimas por el efecto indirecto de varios rayos se registró en Dronka, en Egipto, en 1994, donde acabó con la vida de 469 personas.
- Los rayos de la tormenta provocaron un incendio en tres tanques de petróleo

que contenían 5.000 toneladas de combustible cada uno. El récord de mortalidad directa por los efectos de un rayo se produjo en Zimbabue, en diciembre de 1975. El rayo cayó en una choza en una zona tribal, en lo que entonces era la antigua Rhodesia Oriental, causando la muerte de 21 personas.

- Once jugadores de la República Democrática del Congo en el año de 1998 mueren a causa de una descarga eléctrica.

2.5.1 Incidencias de muertes en América Latina

En los últimos años los rayos causaron la muerte de un promedio de 1,7 personas por cada millón de habitantes en América Latina contra el 0,1 por millón de habitantes en los países desarrollados, según muestra un estudio realizado en Brasil, el primero de su tipo. Esto significa que la incidencia de muertes por rayos en América Latina es 17 veces mayor que en Europa y Estados Unidos. Datos obtenidos en exclusiva por la BBC, son parte de una encuesta realizada por ELAT (Grupo de 25 Electricidad Atmosférica), un organismo vinculado al Ministerio de Ciencia y Tecnología del país sudamericano.

Brasil lidera el número de muertes en números absolutos, por ser el país más poblado del continente y por recibir la mayor cantidad de rayos (un promedio de 50 millones por año). Sin embargo, Cuba y Panamá tienen la mayor proporción de muertes causadas por este fenómeno natural, debido a la alta densidad de descargas eléctricas y el bajo nivel de infraestructuras.

A pesar de que algunos países no ofrecen detalles de las circunstancias de las muertes por rayos, llama la atención de los investigadores la cantidad de muertes que ocurren dentro de las casas en Brasil (20%) y Colombia (35%). En los países desarrollados esta tasa es del 1%. Esto demuestra que hay una falta de infraestructura aquí y de nuestros vecinos. Las redes eléctricas y telefónicas todavía están mucho menos protegidas.

2.5.2 Incidencia de muertes en Colombia

En la mayoría de los países las descargas atmosféricas son las mayores causantes de pérdidas humanas superando otros fenómenos naturales como huracanes y tornados [14]. Entre los años 2010 y 2013, los medios de comunicación reportaron 119 muertos y 291 heridos por rayos en Colombia, para un total de 410 casos. No obstante, se cree que el porcentaje de casos reportado en los medios es muy bajo. En Colombia, se calculan cerca de 100 casos de muertes por rayos al año. si se considera que por cada muerte hay 9 heridos, el número de afectados puede rondar los 1.000. Las investigaciones de las últimas décadas sobre lesiones y muertes relacionadas con fenómenos atmosféricos en el mundo indican que los rayos han sido la tercera causa de muerte y la segunda causa de lesiones superada solamente por las inundaciones. Se calcula que, en regiones tropicales y subtropicales, donde la actividad de rayos es mayor que en zonas templadas, el número anual total de muertos por rayos es alrededor de 24 mil, y los heridos, cerca de 240 mil.

Investigaciones realizadas muestran que la región central de Colombia presenta un comportamiento bimodal, con máxima actividad de rayos en los meses de abril, mayo, octubre y noviembre, mientras que la costa norte tiene un comportamiento monomodal con la máxima actividad de rayos en los meses de junio, julio y agosto. La información actual sobre la actividad de rayos distribuida mensualmente se obtiene que la mayor actividad de rayos en Colombia se presenta en los meses de abril, mayo y septiembre en el cual se registran más de 900.000 rayos, y los meses de enero, febrero y diciembre son los meses donde existe la menor actividad de rayos en Colombia [15].

El mapa de DDT más actualizado para Colombia se muestra en la Figura 1.8, este mapa está basado en la información suministrada por la red de detección y localización total de rayos LINET que opera en Colombia desde septiembre de 2011 [15].

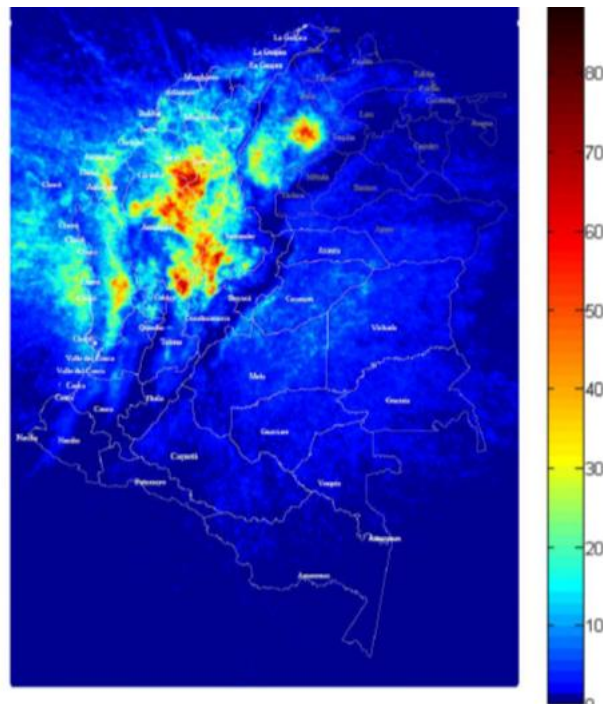


Figura 10. Mapa de densidad de rayos para Colombia, 2012 [15].

Del mapa de DDT se puede notar que las regiones de mayor actividad de rayos en el país son: el Magdalena medio, Choco y el Catatumbo, a continuación, se tiene la densidad promedio para algunas ciudades del país, se puede evidenciar aquellas donde las densidades de descargas a tierra son más altas dependiendo su ubicación geográfica (tabla 1.).

Ciudad	Latitud	Longitud	Densidad Promedio
Barranquilla	10,9	-74,8	1
Cartagena	10,5	-75,5	2
Corozal	9,3	-75,3	3
El Banco	9,1	-74	10
Magangué	9,3	-74,8	5
Montería	8,8	-75,9	2
Quibdó	5,7	-76,6	9
Santa Marta	11,1	-74,2	2
Tumaco	1,8	-78,8	1
Turbo	8,1	-76,7	5
Valledupar	10,4	-73,3	2
Riohacha	11,5	-72,9	2
Armenia	4,5	-75,8	2
Barranca	7	-73,8	7
Bogotá	4,7	-74,2	1
Bucaramanga	7,12	-73,1	1
Cali	3,6	-76,4	1
Cúcuta	7,9	-72,5	1
Ibagué	4,4	-75,12	2
Ipiales	0,8	-77,6	1
Manizales	5	-75,5	2
Medellín	6,1	-75,4	1
Neiva	3	-75,3	1
Ocaña	8,3	-73,4	2
Pasto	1,4	-77,3	1
Pereira	4,8	-82	4
Popayán	2,4	-76,6	1
Remedios	7	-81	12
Villavicencio	4,2	-73,5	1
Bagre	7,8	-75,2	12
Samaná	5,4	-74,8	9

Tabla 1. Densidad de descargas a tierra para las principales ciudades de Colombia [15].

3 MÉTODOS PARA PREVENCIÓN Y DETECCIÓN DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Los efectos de un rayo pueden ser ocasionados por un impacto directo o por causas indirectas. También pueden alcanzar las instalaciones interiores de fábricas, hogares, comercios industrias, etc., a través de las líneas de conexión del suministro de energía eléctrica, por las líneas de conexión de teléfonos, fax, módems, televisión por cable, y también a través de la estructura metálica de los edificios, por contacto directo o por inducción y también por las raíces de los árboles. Por lo cual es necesario que los equipos estén protegidos frente a todas estas posibilidades.

Mientras que un impacto directo puede tener consecuencias catastróficas para las personas, edificaciones, y animales; los daños por causas indirectas suelen ser más numerosos, acompañados de cuantiosas pérdidas económicas. Se entiende como causas indirectas como la caída de rayos en las inmediaciones o sobre los tendidos aéreos o las inducciones electromagnéticas en estos conductores [16].

3.1 SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO (SPE)

Es una parte del SIPRA (Sistema Integral de Protección Contra Rayos) que consta principalmente de los siguientes elementos:

- Sistema de puntas de captación (pararrayos tipo bayoneta)
- Sistema de conductores bajantes
- Sistema de puesta a tierra

Este tipo de dispositivos en o sobre el elemento a proteger cumplen con el objetivo de captar, conducir y dispersar la energía de un rayo cuando la estructura a proteger sea impactada por una descarga eléctrica atmosférica [17].

3.1.2 Función del Sistema de Protección Externo

Un sistema de protección externo tiene como función esencial interceptar las descargas que se dirigen hacia la estructura, incluyendo aquellas que pueden impactar en sus costados y conducir la corriente del rayo hasta el suelo o terreno, dispersando allí la corriente. Este sistema debe dispersar la energía sin causar

daños térmicos, electrodinámicos o mecánicos, ni chispas peligrosas que puedan iniciar un fuego o una explosión.

Se consideran dos tipos de protección externa: uno aislado eléctricamente de la estructura y otro unido directamente a la misma. La decisión de qué tipo de sistema a utilizar depende del riesgo de efectos térmicos o explosivos en el punto de impacto de rayo y del tipo de elementos almacenados en la estructura.

3.1.3 Sistema de Captación

El sistema de captación es el encargado de interceptar las descargas atmosféricas que vayan a impactar directamente a la estructura y enviar la corriente de la descarga a las bajantes de la estructura. Puede estar compuesta por cualquier combinación de los siguientes elementos:

- Varilla tipo Franklin: Su misión es provocar la excitación atmosférica por encima de cualquier otro punto de la estructura a proteger, para aumentar la probabilidad que la descarga incida en su zona de influencia, y derivar a tierra la corriente del rayo.
- Cables colgantes: Protección formada por uno o múltiples conductores aéreos situados sobre la estructura a proteger. Los conductores se deberán unir a tierra mediante aterrizadores en cada uno de sus extremos. El área protegida vendrá dada por el área formada por el conjunto de conductores aéreos.
- Malla de conductores: El sistema consiste en la recepción del rayo a través de un conjunto de puntas captadoras unidas entre sí por cable conductor, formando una malla, y derivarla a tierra mediante una red de conductores.

3.1.4 Sistema de Pararrayos

Las instalaciones de pararrayos consisten en un mástil metálico (acero inoxidable, aluminio, cobre o acero) con un cabezal captador. El cabezal tiene muchas formas en función de su principio de funcionamiento: puede ser en punta, multipuntas, semiesférico o esférico y debe sobresalir por encima de las partes más altas del edificio. El cabezal está unido a una toma de tierra eléctrica por medio un cable de cobre conductor. La toma de tierra se construye mediante picas de metal que hacen

las funciones de electrodos en referencia al terreno o mediante placas de metal conductoras también enterradas.

En principio, un pararrayos protege una zona teórica de forma cónica con el vértice en el cabezal; el radio de la zona de protección depende del ángulo de apertura de cono, y éste a su vez depende de cada tipo de protección. Las instalaciones de pararrayos se regulan en cada país por guías de recomendación o normas. Un sistema de protección contra descargas, llamado de pararrayos, debe:

- Capturar el rayo en el punto diseñado para tal propósito llamado terminal aérea.
- Conducir la energía de la descarga a tierra, mediante un sistema de cables conductores que transfiere la energía de la descarga mediante trayectoria de baja impedancia.
- Disipar la energía en un sistema de terminales (electrodos) en tierra.

3.1.5 Protección con Sistema Franklin

Los pararrayos Franklin, de forma cónica, tienen una punta perfectamente aguzada y estética. Existen en versión cobre niquelado cromado y en acero inoxidable; su longitud estándar es de 2,40 m y puede ser aumentada adjuntando elementos alargadores en acero tratado o acero inoxidable. Estos conjuntos no necesitan estar tensionados por cables y pueden alcanzar alturas de hasta 7 a 8 metros. La extremidad de los pararrayos Franklin tiene una punta llena en bronce marino o inoxidable, este sistema se aplica en iglesias, casas de campo, graneros y otras estructuras ordinarias.

3.1.6 Protección Pararrayos PDC

Un Pararrayos con Dispositivo de Cebado, conocido también por la abreviatura PDC o por el nombre de pararrayos ionizante, es un sistema de protección externa contra el rayo de alta tecnología. El pararrayos con dispositivo de cebado emite un trazador ascendente continuo con un tiempo de avance, para anticiparse al descenso del rayo y captarlo antes que cualquier otro objeto dentro de su radio de protección. El tiempo de avance en el cebado determina el radio de protección del PDC: cuanto más se adelante su trazador ascendente, a mayor altura captura el trazador

descendente del rayo y evita la caída de rayos en un área mayor.

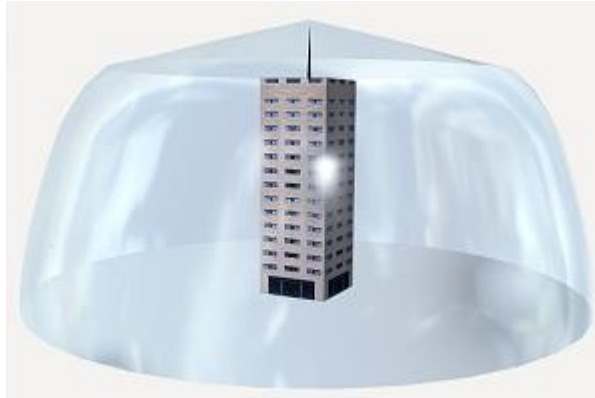


Figura 11. Protección Pararrayos PDC [24].

3.1.7 Principio de Protección con un Sistema Tipo Jaula de Faraday

El principio de Faraday establece que el material encerrado dentro de una envolvente de material conductor, cuando este conductor es conectado a tierra, queda libre de interferencias electromagnéticas y que cualquier fenómeno eléctrico, por intenso que sea, no causara ningún efecto en el interior de la envoltura, ya que esta sirve como pantalla o blindaje del interior.

El efecto esperado consistirá en que las corrientes eléctricas causadas por cargas electrostáticas externas, tenderán a circular por el material conductor de la periferia sin daño o afectación a los elementos encerrados dentro de este espacio y que no circularán corrientes eléctricas dentro de dicho volumen encerrado. Bajo este principio, al recubrir una edificación de una malla de material conductor, las corrientes eléctricas de origen atmosférico tenderán a circular por estos conductores en el exterior del edificio y pueden ser canalizadas a tierra de forma segura sin daño del inmueble o personas dentro de este blindaje tal y como se puede apreciar en la figura 12, la zona de cobertura es mucho mayor que con cualquier otro dispositivo de protección, permitiendo con un solo dispositivo de captación se puedan proteger edificios, construcciones o instalaciones de gran superficie [18].

Un pararrayos nimbus no es comparable a una punta Franklin, sino a toda una instalación de ellas, necesarias para cubrir la misma área de protección, con el consiguiente ahorro en instalación y materiales de bajantes, tomas de tierra,

equipotencialidad de las mismas, etc. También presenta ventajas con respecto a los otros sistemas para la protección de estructuras abiertas, como pueden ser superficies al aire libre, instalaciones deportivas, etc.

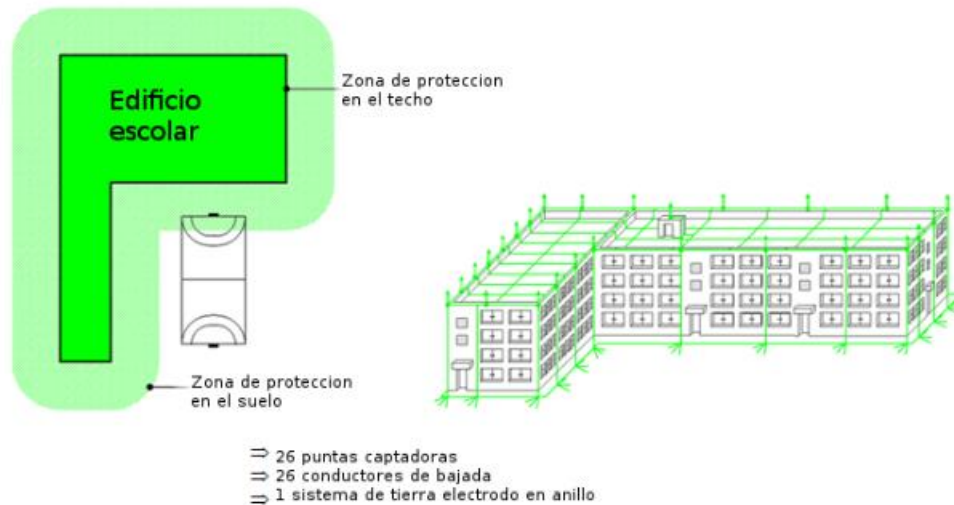


Figura 12. Zona de Protección por jaula de Faraday [18].

3.1.8 Varillas Tipo Franklin (Bayonetas)

Su misión es provocar la excitación atmosférica por encima de cualquier otro punto de la estructura a proteger, para aumentar la probabilidad que la descarga incida en su zona de influencia, y derivar a tierra la corriente del rayo [19].

3.1.9 Cables Colgantes

Este sistema consiste en la protección formada por uno o múltiples conductores aéreos situados sobre la estructura a proteger. Los conductores se deben unir a tierra mediante aterrizadores en cada uno de sus extremos [19].

3.1.10 Malla de Conductores

Este sistema consiste en la recepción del rayo a través de un conjunto de puntas captadoras unidas entre sí por cable conductor, formando una malla que deriva a tierra mediante una red de conductores [19].

3.1.11 Sistema de Bajantes

Este sistema tiene como objetivo conducir las corrientes de rayo por el sistema de captación aérea y llevarlas de forma segura hacia el sistema de puesta a tierra. Para ello las bajantes deben ser ubicadas de manera tal que, a partir del punto de impacto del rayo hasta la tierra, se cumplan 3 requisitos:

- Existencia de varios caminos paralelos para la corriente.
- La longitud de los caminos de corriente sea mínima.
- Equipotencialización de partes conductoras de la estructura.

Una buena práctica de construcción consiste en realizar conexiones laterales de las bajantes cada 10 m o 20 m de separación, principalmente en edificios de alturas superiores a 30 metros. Así mismo, es pertinente instalar tantas bajantes como sea posible igualmente espaciadas alrededor del perímetro interconectado por el anillo conductor, lo cual reduce la probabilidad de chispas peligrosas y facilita la protección interna. Esta condición es cumplida en estructuras con marcos metálicos y estructuras de concreto reforzado en el cual el acero interconectado es eléctricamente continuo [19].

Se consideran dos tipos de sistemas de bajantes, aquel que puede estar aislado eléctricamente de la estructura y otro unido directamente a la misma. La decisión de cual tipo de sistema utilizar depende del riesgo de efectos térmicos o explosivos en el punto de impacto de rayo y del tipo de elementos almacenados en la estructura.

La instalación de un sistema aislado depende del sistema de captación aérea:

- Si el sistema de captación aérea consiste en varillas montadas en postes o mástiles no metálicos o de material sin refuerzo en acero interconectado, es necesario al menos una bajante por cada poste.
- Si los postes son metálicos o con material con acero interconectado no es necesario el uso de bajantes, siempre y cuando se garantice continuidad entre la punta de captación y el sistema de puesta a tierra.
- Si el sistema de captación aérea consiste en cables colgantes, es necesario

al menos una bajante en cada soporte de los cables. □ Si el sistema de captación aérea consiste en una red de conductores, es necesario al menos un bajante en cada soporte del terminal.

Para la ubicación de sistema de bajantes no aislado, el número de bajantes no debe ser inferior a 2 y debe estar distribuido por el perímetro de la estructura a proteger, sujeto a restricciones prácticas y arquitectónicas [19].

Es importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones respecto a las bajantes:

- La longitud debe ser la menor posible, evitando la formación de lazos o curvaturas en su trayectoria y en el caso que estas últimas sean inevitables, su ángulo no debe ser menor a 90 grados y su radio de curvatura no menor a 200 mm.
- No es recomendable ubicar bajantes en áreas donde se congreguen o transiten personas frecuentemente, como es el caso de escaleras o vías operacionales.
- Es recomendable que exista una bajante en cada esquina expuesta a la estructura.
- Deben ser instaladas de tal manera que garanticen la continuidad eléctrica entre los conductores del sistema de captación aérea.
- No deben ser instaladas dentro de canaletas para aguas, aun si estas están cubiertas con material aislante. Los efectos de la humedad en las canaletas para aguas producen gran corrosión en los conductores de las bajantes.

Es recomendable que las bajantes se ubiquen de manera tal que permitan tener un aislamiento eléctrico o una distancia adecuada entre las puertas y las escaleras metálicas de acuerdo con lo descrito a continuación: En el caso de líneas o partes conductoras externas conectadas a la estructura, es siempre necesario asegurar la unión equipotencial (por conexión directa o por medio de DPS) en el punto más cercano al ingreso a la estructura.

3.1.12 Sistema de Puesta a Tierra – SPT

El sistema de puesta a tierra es usado para dispersar y disipar la corriente de rayo que viene por las bajantes reduciendo al mismo tiempo el peligro de tener tensiones de paso y de contacto peligrosas. La forma de puesta a tierra y sus dimensiones son un criterio importante en su diseño. En términos generales, para el sistema de protección externa se debe buscar un bajo valor de resistencia de puesta a tierra (si es posible menor a $10\ \Omega$ en baja frecuencia).

Para los sistemas de puesta a tierra de la protección contra rayos es recomendable que estos estén interconectados con todos los sistemas de puesta a tierra (comunicaciones, potencia, ductos, etc.) [19].

3.1.12.1 Objetivo de un Sistema de Puesta a Tierra – SPT

Las razones que más frecuentemente se citan para tener un sistema aterrizado, son:

- Proporcionar una impedancia suficientemente baja para facilitar la operación satisfactoria de las protecciones en condiciones de falla.
- Asegurar que seres vivos presentes en la vecindad de las subestaciones no queden expuestos a potenciales inseguros, en régimen permanente o en condiciones de falla.
- Mantener las tensiones del sistema dentro de límites razonables bajo condiciones de falla (tales como descarga atmosférica, ondas de maniobra o contacto inadvertido con sistemas de tensión mayor), y asegurar que no se excedan las tensiones de ruptura dieléctrica de las aislaciones.
- Hábito y práctica.
- En transformadores de potencia puede usarse aislación graduada.
- Limitar la tensión a tierra sobre materiales conductivos que circundan conductores o equipos eléctricos.

Otras razones citadas menos frecuentemente, incluyen:

- Estabilizar las tensiones fase a tierra en líneas eléctricas bajo condiciones de régimen permanente, por ejemplo, disipando cargas electrostáticas que se han generado debido a nubes, polvo, agua, nieve, etc.
- Una forma de monitorear la aislación del sistema de suministro de potencia. Para eliminar fallas a tierra con arco eléctrico persistente.
- Para asegurar que una falla que se desarrolla entre los enrollados de alta y baja tensión de un transformador pueda ser manejada por la protección primaria.
- Proporcionar una trayectoria alternativa para las corrientes inducidas y de tal modo minimizar el ruido eléctrico en cables.
- Proporcionar una plataforma equipotencial sobre la cual pueda operar equipo electrónico.

Para tener un óptimo funcionamiento del sistema de puesta a tierra, se deben analizar dos fenómenos: los rayos y las fallas a tierra en los sistemas de potencia.

Se considera a su vez la importancia de implementar este sistema a la hora de analizar las descargas atmosféricas ya que este fenómeno puede causar circulación de grandes corrientes, las cuales pueden crear tensiones peligrosas en las instalaciones. La amplitud de las corrientes abarca un rango entre unos pocos amperios hasta las decenas de kiloamperios por fallas o rayos.

3.1.13 Terminal de tierra

Este puede consistir de un anillo de cobre enterrado (designado en EE.UU. como contrapeso) que rodea la estructura y/o barras de tierra verticales. Se requiere que la impedancia del terminal de tierra (es decir, después de una conexión de bajada) sea máximo de 10 ohm. El aluminio no se permite para uso bajo tierra. Cada conductor de bajada debe tener su propio electrodo de tierra terminal y estos normalmente están conectados entre sí para formar un anillo, con electrodos horizontales usados para interconectarlos y ayudar a reducir la impedancia global. Los terminales de tierra más comunes son barras de al menos 1,5 m de longitud, con un mínimo para cada sistema de 9 m.

El anillo ayuda a lograr una ecualización de potencial en la superficie del suelo,

además de controlar el potencial. Esto último ayuda a reducir la tensión de contacto que puede experimentar una persona en contacto con el conductor de bajada durante una descarga atmosférica.

4 SISTEMAS DE ALARMA DE TORMENTAS (SAT)

Tanto la norma IEC-62793 “Protection against lightning - Thunderstorm warning systems”, como Cooray, definen un sistema de alarma de tormentas como un sistema que consiste en un dispositivo o conjunto de dispositivos para la detección de rayos o tormentas eléctricas relacionadas al fenómeno, y una aplicación o algoritmo que utiliza la información proveniente del sistema de detección para emitir alarmas de rayos. Sin embargo, no siempre es posible contar con sistemas sofisticados de monitoreo que soporten y brinden información en tiempo real sobre la actividad eléctrica atmosférica. Por esta razón, la técnica más sencilla de un SAT es el llamado método de la regla 30 – 30 usada por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration-NOAA) de los Estados Unidos, la cual es recomendada para tomar medidas de seguridad en casos donde personas o pequeños grupos que permanecen en áreas exteriores no cuenten con equipos o sistemas especializados de monitoreo. Esta regla permite calcular la ubicación aproximada del impacto del rayo, calculando el tiempo que transcurre entre el instante en el cual se ve el relámpago y el instante en que se escucha el trueno; si este periodo es menor a 30 segundos indica que la tormenta esta lo suficientemente cerca para representar una amenaza. Por seguridad, es necesario esperar 30 minutos después de que se escuche el ultimo trueno para confirmar que la tormenta se ha alejado o disipado [13].

4.1 CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DE LOS DETECTORES DE TORMENTAS

Existen varios tipos de técnicas las cuales pueden medir los diferentes fenómenos presentes en una tormenta eléctrica, entre los cuales se encuentran: Detección de dirección magnética (Magnetic Direction Finder-MDF), tiempo de arribo (Time of arrival-TAO), interferometría (interferometry-RFI), Mediciones de intensidad de campo (field strength measurements-FSM) y mediciones de señales de intensidad de radiofrecuencia (radio frequency signal strength measurements-RF). Así como existen diferentes técnicas, los rangos de frecuencia usados para la detección de rayos son: DC (campo eléctrico estático y cuasi estático), con una muy baja frecuencia con rangos entre 3 kHz y 30 kHz (Very Low Frecuencias-VLF), baja frecuencia con rangos entre 30 kHz y 300 kHz (Low Frecuencias-LF) y muy altas frecuencias con un rango entre 30 MHz y 300 MHz (Very High Frecuencias-VHF) [13].

Los dispositivos de alarma de tormentas se clasifican en relación con la etapa del ciclo de vida de una tormenta que son capaces de detectar y de sus fenómenos asociados: (1) fase inicial, (2) fase de crecimiento, (3) fase de maduración y (4) fase de disipación. Así, los dispositivos se clasifican en cuatro clases: clase A, clase B, clase C y clase D.

Los sensores que se ubican en la clase A tienen la capacidad de detectar todo el ciclo de vida de las tormentas (fase inicial, fase de crecimiento, fase de maduración y fase de disipación), dentro de esta clasificación se encuentran los molinos de campo eléctrico.

Los sensores de clase B pueden detectar los rayos intranube y nube-tierra (fase 1 a la fase 4), las redes de localización y detección de rayos intranube y nube–tierra pertenecen a esta clase.

Los sensores que pertenecen a la clase C pueden detectar rayos nube-tierra (fase 3), aunque poseen una eficiencia limitada. Los detectores de clase D detectan rayos nube-tierra, aunque tienen una baja capacidad de distinguir entre un evento de rayo y otro tipo de señal electromagnética. La Tabla 2. muestra las diferentes técnicas de detección de tormentas eléctricas y algunas de sus características [13].

Técnica	Fenómeno Físico Detectable	Frecuencia	Fases	Clase Principal	Clase Secundaria	Rango Típico del sensor [km]	Aplicación
FSM	Proceso de electrificación	DC	1, 2, 3, 4	A		20	Rango corto, sistema de alerta temprana
RFI	Descarga y proceso del líder (rayos nube-tierra e intranube)	VHF	2, 3	B	C	300	Rango medio y alta precisión en la localización de rayos nube-tierra e intranube
TOA	Descarga y proceso del líder (rayos nube-tierra e intranube)	VHF	2, 3	B	C	200	Rango medio y alta precisión en la localización de rayos nube-tierra e intranube
MDF TOA	Radiación electromagnética (corriente de rayo)	LF	2, 3	C	B	600-900	Rango alto y alta precisión en la localización de rayos nube-tierra
MDF	Movimiento de cargas eléctricas	VLf	2,3	C	B	Sin limite	Muy alto rango de detección y baja eficiencia en la predicción y localización.
RF	Radiación electromagnética (Corriente de rayo)	LF	3	D		100	Interés en meteorología
La clase principal es la clase para la cual el detector se diseña. La clase secundaria es la clase o clases para las cuales el sensor también es adecuado.							

Tabla 2 Técnicas de detección de tormentas eléctricas y algunas de sus características [13].

4.2 REDES DE LOCALIZACIÓN DE RAYOS EN COLOMBIA

En el año de 1995, Interconexión Eléctrica S.A-E.S. P (ISA) con el apoyo académico de la Universidad Nacional de Colombia, adquiere el primer sistema de localización de rayos conocido como la Red Colombiana de Medición y Localización de Descargas Eléctricas Atmosféricas (RECMA). El sistema se conformó con el conjunto de seis sensores de baja frecuencia y tecnología (Lightning Position and Tacking System-LPATS) distribuidos en Colombia tal como se muestra en la (Figura 13). Adicionalmente, con la cooperación de las Empresas Públicas de Medellín (EPM), se instalaron cinco dispositivos LLP (Lightning Location and Protection), distribuidos en la región central de Colombia que se pueden visualizar en la figura 13, conformándose el primer sistema de medición indirecta de rayos en el territorio nacional [1].



Figura 13. Red Colombiana de medición y localización de descargas atmosféricas RECMA [13].

Posteriormente, la RECMA fue reemplazada por el Sistema de Información de Descargas Atmosféricas (SID), con la actualización del sistema LPATS por equipos de medición de baja frecuencia LS 7000 (Lightning Sensor 7000).

Actualmente el SID cuenta con seis dispositivos de medición los cuales emplean las técnicas de detección de la dirección magnética (Magnetic Direction Finding – MDF) y tiempo de arribo (Time of Arrival – TOA) para la estimación de los parámetros físicos asociados a los rayos (Figura 14).



Figura 14. Sistema de Información de Descargas Atmosféricas (SID) [13].

En septiembre de 2011 entra en operación la red de localización y detección de rayos (LINET). Esta tecnología fue desarrollada en la Universidad de Múnich Alemania y tiene la capacidad de detectar tanto rayos nube-tierra (CG) como rayos intranubes (IC). El sistema trabaja a VLF/LF, debido a la técnica de detección TOA, y al algoritmo mejorado [13]. Estas características le permiten proveer no solo información de la posición horizontal (latitud, longitud) sino también de la posición vertical del rayo detectado [20]. Actualmente esta red se compone de 10 sensores instalados y cubre aproximadamente el 80% del territorio colombiano, teniendo una eficiencia superior al 95% sobre el interior del país (figura 15.)

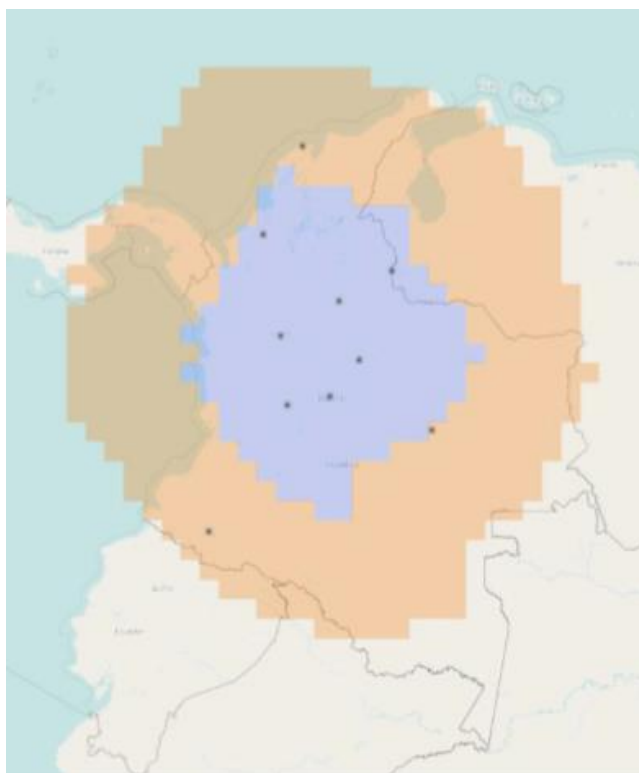


Figura 15. Red de localización y detección de rayos LINET [13].

5 RECOPIACION DE ESTADÍSTICAS E INFORMACIÓN

5.1 ESTADÍSTICAS PARA COLOMBIA

Colombia se encuentra entre el norte con la latitud 13° N y al sur con la latitud 3° S, de acuerdo con la información suministrada por el Instituto de Estudios Ambientales IDEA, quien indica que Colombia se encuentra en la región intertropical ya que la mayor parte de su territorio se encuentra en la zona de los trópicos húmedos.

El país está dividido en 33 departamentos, en donde la población media es de 43,889,699 habitantes, incluyendo la población de San Andrés y Providencia. A continuación, se muestran el número de muertes por departamento (figura 16) y se registra en la tabla 3 [20].

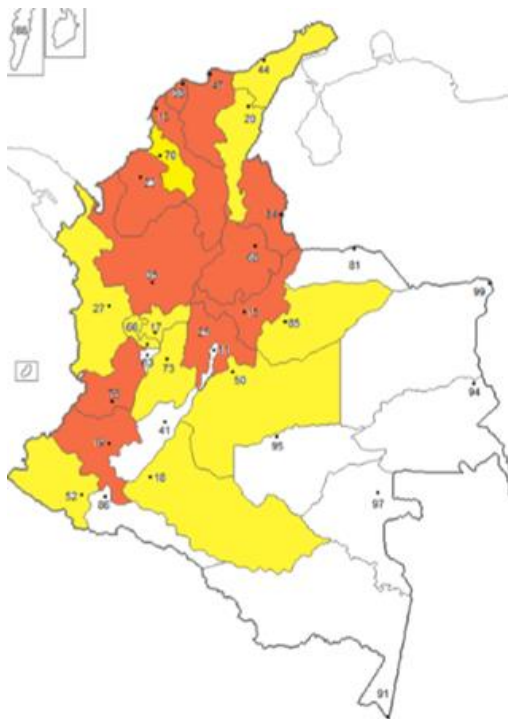


Figura 16. Mapa de muertes por descargas atmosféricas por departamento en Colombia [20].

Código	Departamento	Muertes	Población	Muertes anuales (Millón por año)	% Población Rural
97	VAUPES	3	39,033	7.69	64.7
19	CAUCA	71	126,385,858	5.62	62
99	VICHADA	3	55,188	5.44	62.4
95	GUAVIARE	5	94,866	5.27	47.9
18	CAQUETA	14	418,052	3.35	45
15	BOYACA	41	1,253,671	3.27	48.5
47	MAGDALENA	37	1,145,230	3.23	31.3
94	GUAINIA	1	34,922	2.86	69.4
44	LA GUAJIRA	19	667,684	2.85	46.1
68	SANTANDER	55	1,952,806	2.82	27.2
23	Córdoba	41	1,457,229	2.81	49.7
85	Casanare	8	292,197	2.74	32
20	Cesar	24	897,334	2.67	29.4
81	Arauca	6	231,074	2.6	39.5
5	Antioquia	142	5,643,511	2.52	23.9
13	Bolívar	45	1,870,660	2.41	25.5
54	Norte de Santander	25	1,238,465	2.02	23.8
50	Meta	15	774,750	1.94	27.1
86	Putumayo	6	308,638	1.94	56.3
27	Chocó	8	451,965	1.77	52.1
70	Sucre	13	768,273	1.69	36
25	Cundinamarca	37	2,260,293	1.64	36
91	Amazonas	1	67,277	1.49	62.1
52	Nariño	19	1,531,949	1.24	53.9
66	Risaralda	11	894,525	1.23	23.1
8	Atlántico	25	2,151,045	1.16	5
76	Valle del Cauca	38	4,139,615	0.92	13.7
73	Tolima	12	1,362,424	0.88	34.4
73	Tolima	12	1,362,424	0.88	34.4
41	Huila	2	1,004,140	0.2	40.6
88	San Andrés	0	70,237	0	28.5
0	Total Nacional	total	42,628,541	1.78	25.6

Tabla 3. Número de muertes por descargas atmosféricas por departamento [20].

En general, los números más grandes se encuentran en el noroeste, y los números más bajos se encuentran en los departamentos del este y lejano oeste. No se registraron muertes por relámpagos en el archipiélago de San Andrés durante los años de estudio.

Cuando se toma en cuenta la población, los departamentos del sureste menos poblados tienen las tasas de mortalidad más altas, mientras que las tasas de mortalidad más bajas se encuentran en el oeste, donde la población también es escasa. El promedio de la población estimada de cada departamento se usó durante los años 2004 y 2005 (el punto medio del tiempo del estudio) como el denominador de la tasa de mortalidad. La tasa de mortalidad por población en la Figura 16 y la Tabla 3 varía de cero a 7.69 por millón por año entre los departamentos. La tasa anual de muertes por rayos en Colombia en general es de 1,78 por millón por año [20].

Con respecto a la distribución urbana de muertes, 163 muertes (21.5%) ocurrieron en ciudades capitales municipales, 115 (15.2%) murieron en ciudades como inspecciones, municipios o aldeas, y 471 (62.2%) en áreas rurales dispersas. La información de ubicación estaba disponible en todos menos ocho certificados (1.1%). En Colombia, un municipio es la entidad territorial básica de la división administrativa de un estado con al menos 14,000 habitantes, tiene una sede municipal que usualmente lleva el mismo nombre del municipio y sirve como su capital. Las poblaciones más pequeñas que los municipios denominados "centros poblados" tienen al menos 20 casas contiguas, vecinos o están unidas entre sí en el área rural de un municipio. En general, los departamentos con las tasas de mortalidad más altas son a menudo los departamentos más rurales donde la exposición diaria puede ser máxima y la vivienda segura y el refugio son limitados.

En cuanto a los meses con mayor número de reportes de accidentes o muertes por descargas atmosféricas según las estadísticas publicadas por la compañía Keraunos S.A.S, se tiene que desde el 2010 hasta el 2013, los meses: marzo, mayo y agosto, son los meses con mayor cantidad de reportes, tal y como se evidencia en la siguiente figura 17.

ESTADÍSTICAS - COLOMBIA

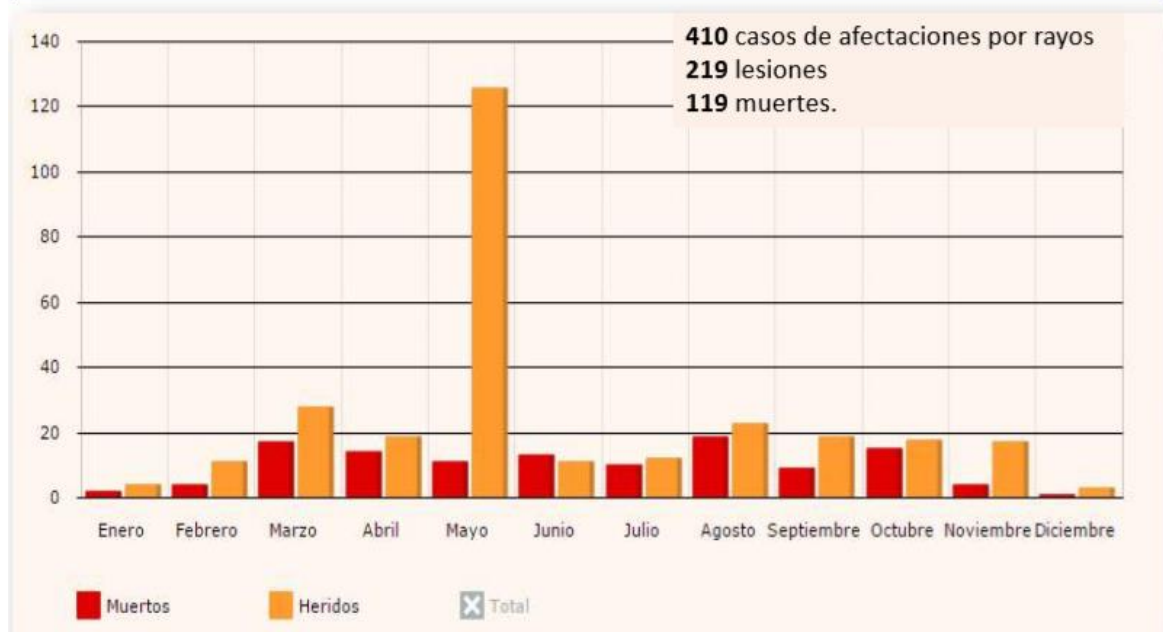


Figura 17. Lesiones y muertes por rayos en Colombia 2010-2013 [3].

La figura anterior concuerda con la información actual sobre la actividad de rayos, que indica que la mayor actividad de rayos en Colombia se presenta en los meses de abril, mayo y septiembre en el cual se registran más de 900.000 rayos, y los meses de enero, febrero y diciembre son los meses donde existe la menor actividad de rayos en Colombia [3].

5.2 ESTADÍSTICAS PARA PEREIRA RISARALDA

Se ha recopilado información de los últimos 10 años (2008-2018) relacionados con las descargas atmosféricas que afectan a la ciudad de Pereira y sus alrededores. La información proviene de la base de datos de la Empresa de Energía de Pereira, quien mediante los diferentes sistemas de identificación de fallas puede detectar el tipo de evento que surge en las redes, de los cuales se asocia la afectación a una zona específica de la ciudad incluyendo así el sector donde se encuentra ubicada la Universidad Tecnológica de Pereira, quien es el caso de estudio para el presente trabajo.

En promedio de los últimos 10 años el 15% de descargas atmosféricas detectadas en la ciudad inciden sobre la Universidad Tecnológica de Pereira y el 49% se

registran en la zona rural, siendo esta categoría la más afectada, dejando así el 36% para la zona urbana tal y como se muestra en la figura 18.

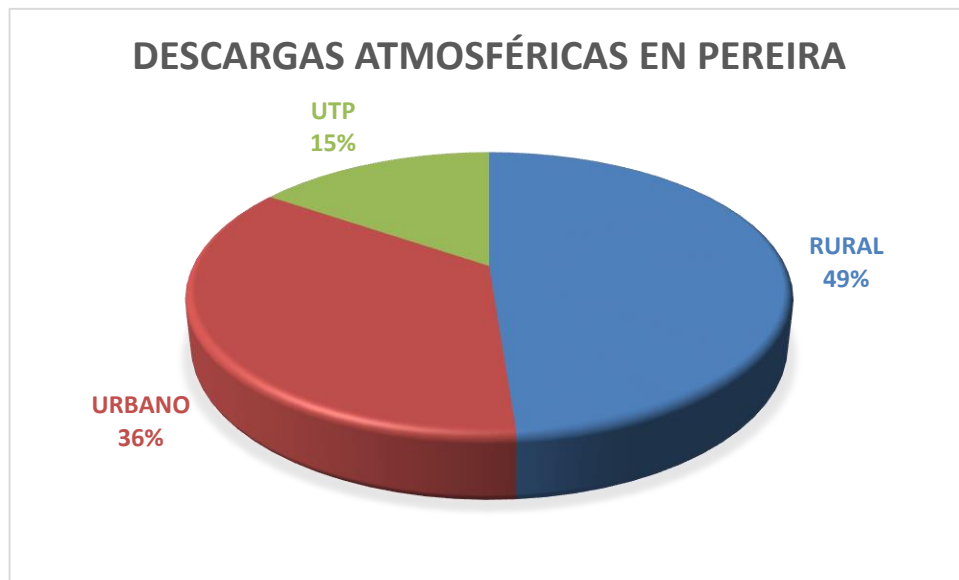


Figura 18. Porcentaje de descargas atmosféricas detectadas entre los años 2008-2018, para la ciudad de Pereira, UTP y su zona veredal, fuente del autor. Fuente: del autor.

5.2.1 Relación por año de las descargas atmosféricas detectadas.

Cabe aclarar que los impactos recibidos son registrados de la siguiente manera: si para el día 14 de diciembre del 2018 se presentaron descargas eléctricas que fueron registradas tanto en la zona rural como en la zona urbana de la ciudad, entonces es una descarga que tiene doble registro, ya que muchos de los eventos se pueden producir en las dos zonas debido a la magnitud del fenómeno.

Ejemplo: Para diciembre del 2018 se tuvieron 5 días registrados con descargas atmosféricas el 12,13,14,20 y 21 de los cuales, los 5 días con presencia de descargas, 4 de estos se registraron en la zona Rural y 3 en la zona urbana, dos de estos días se vieron afectados tanto en la zona rural como urbana y 2 días tuvieron registro solo en la zona rural o solo un día en la zona urbana, como lo relaciona la tabla 4.

MES	FECHA	RURAL	URBANO
DICIEMBRE	12/12/2018	1	1
	13/12/2018		1
	14/12/2018	1	1
	20/12/2018	1	
	21/12/2018	1	
TOTAL		4	3

Tabla 4. Descargas atmosféricas registradas en diciembre de 2018. Fuente: del autor.

los diferentes sistemas de protección y detección de fallas de la red de Pereira, han registrado que para el año 2015 se presentaron la mayor cantidad de reportes de descargas atmosféricas, dejando registradas 122 en totalidad, las cuales tuvieron incidencia de 114 en la zona rural y a su vez 90 en la zona urbana y sólo 8 de estas descargas se registraron en la zona urbana sin afectar la zona rural de la ciudad.

Para el año 2018 se tuvo el reporte de descargas atmosféricas más baja en los últimos 10 años, con un total de 55 registros de afectación, donde el 70% se vieron registradas en la zona rural y el 30% restante en la zona urbana.

Para la Universidad Tecnológica de Pereira en el 2013 y 2015 se tuvo el reporte más alto de descargas atmosféricas con un número de 37 afectaciones en total para cada año, en cambio el 2010 fue el año con menor afectación de 16 descargas atmosféricas registradas, la tabla siguiente contiene los datos registrados por cada año.

AÑO	TOTAL	UTP
2008	81	24
2009	88	17
2010	62	16
2011	100	23
2012	103	24
2013	100	37
2014	110	23
2015	122	37
2016	84	32
2017	83	32
2018	55	19

Tabla 5. Afectaciones de descargas atmosféricas por año en la Universidad Tecnológica de Pereira. Fuente: del autor.

En los datos obtenidos la zona con mayor influencia de descargas atmosféricas es la zona rural, que para la ciudad de Pereira la actividad de descargas atmosféricas en el 60% supera el doble del total registradas en la zona urbana, tal y como se evidencia en el siguiente gráfico.

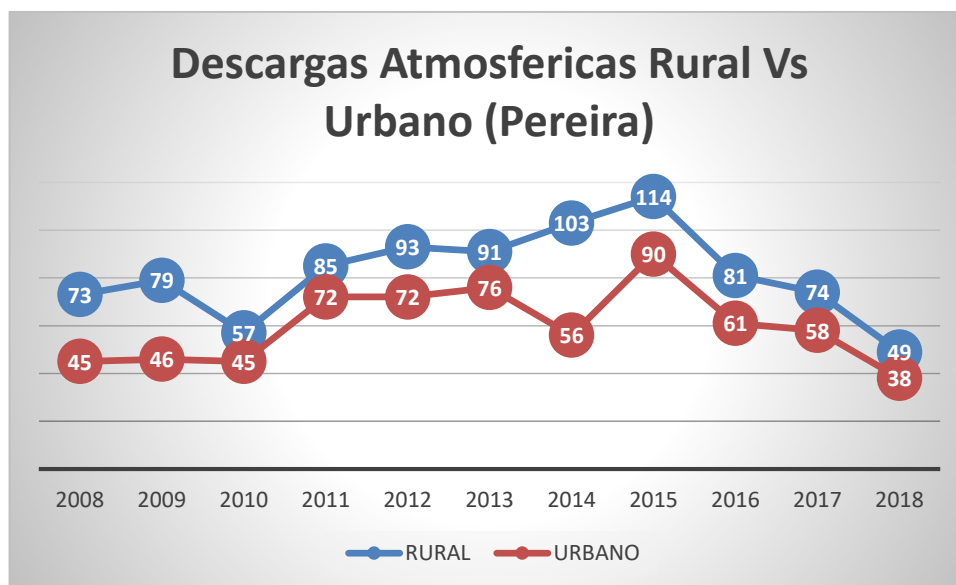


Figura 19. Descargas atmosféricas rurales y urbanas en la ciudad de Pereira. Fuente: del autor.

La zona rural de la ciudad cuenta con cualidades que propician la actividad de los rayos, ya que se cuenta con características de zonas montañosas y que presentan confluencia de aires cálidos de la zona baja, con unas corrientes de aire frías y con carga de humedad. La mezcla en el ambiente ocasiona las nubes de desarrollo vertical que genera las cargas eléctricas.

Si se tiene en cuenta que el riesgo eléctrico por rayos tiene que ver mucho con el tiempo de exposición al aire libre, hace que las personas que realizan actividades en campos abiertos y zonas boscosas, sean más afectadas por este fenómeno. El riesgo que tiene una persona en ser impactada por un rayo es diferente dependiendo su ocupación ya que trabajar en labores rurales como campesinos y soldados es diferente a trabajar en labores de oficina, pues el riesgo es menor en comparación. Además, ciertas zonas con gran número de personas como estadios, zonas deportivas también entran en esta categoría que se encuentra con alto grado de exposición. En Colombia el código sustantivo del trabajo indica que la jornada laboral en Colombia por lo general son 48 horas semanales, es decir que en promedio se puede decir que una persona que trabaja al aire libre puede estar

expuesta aproximadamente entre 48 horas y 56 horas. La fracción de tiempo de exposición al año (*ter*) está dada como:

$$ter = (hd * ds) * 48\ 8064 \text{ [Año]}$$

Donde **hd** son las horas de exposición al aire libre en un día, **ds** son los días a la semana que se expone la persona.

Confrontando los datos obtenidos con los suministrados por el IDEAM, donde se comparan los meses con mayor actividad de descargas atmosféricas para la ciudad de Pereira, reportando en promedio la cantidad de días con descargas atmosféricas registradas por mes, se puede ver que efectivamente concuerdan con los datos obtenidos de la Empresa de Energía de Pereira, tal y como se evidencia a continuación:

Figura 20. Tormentas eléctricas en Pereira (Según EEP). Fuente: del autor.

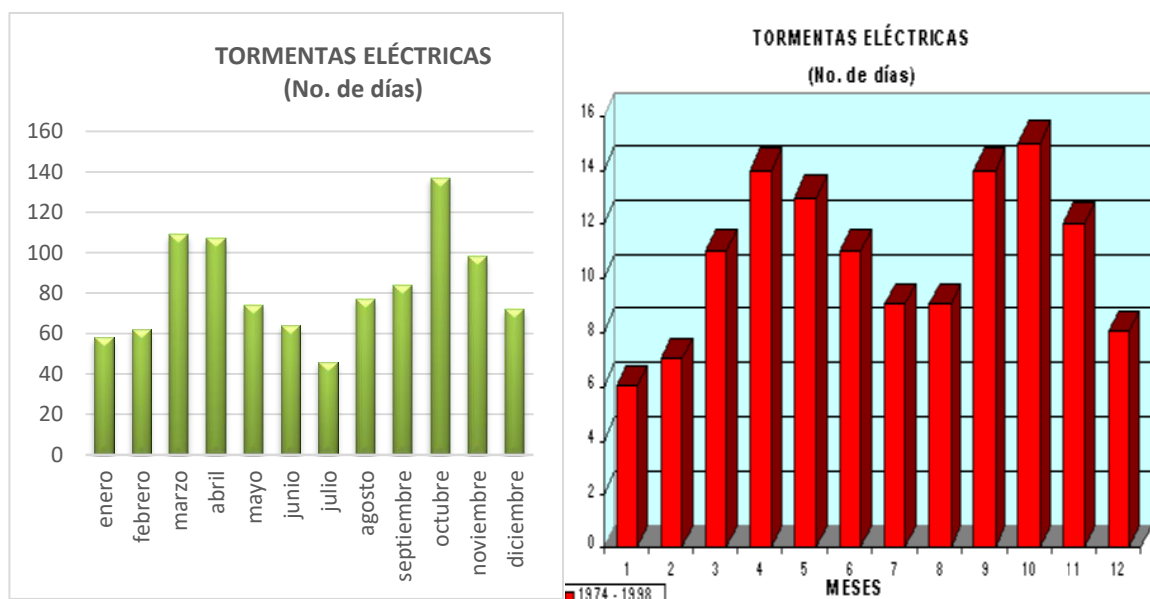


Figura 21. Tormentas eléctricas en Pereira (Según IDEAM) [25].

De las figuras 20 y 21, se puede observar que para los meses de: marzo, abril, mayo, septiembre y octubre y noviembre, son los meses con mayor número de descargas atmosféricas registradas a diferencia de los meses de enero, febrero, junio, y julio en donde se tiene la menor cantidad de reportes. Cabe resaltar que a pesar de que los tiempos de evaluación tomados del IDEAM, no son de los años

analizados (2008-2018), la tendencia es similar. Se puede observar que los meses con mayor y menor reporte son los mismos, aunque la cantidad registrada a incrementado con el tiempo.

5.3 AFECTACIONES REGISTRADAS EN LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

Con la información recopilada sobre los eventos detectados para la ciudad de Pereira mediante los diferentes dispositivos de detección de fallas en el sistema de distribución, se extrae la información de las descargas atmosféricas que afectan a la Universidad Tecnológica de Pereira.

La tabla 6. muestra el resumen de la información de los eventos reportados mes a mes durante los últimos 10 años que inciden sobre el campus de la universidad y sus alrededores.

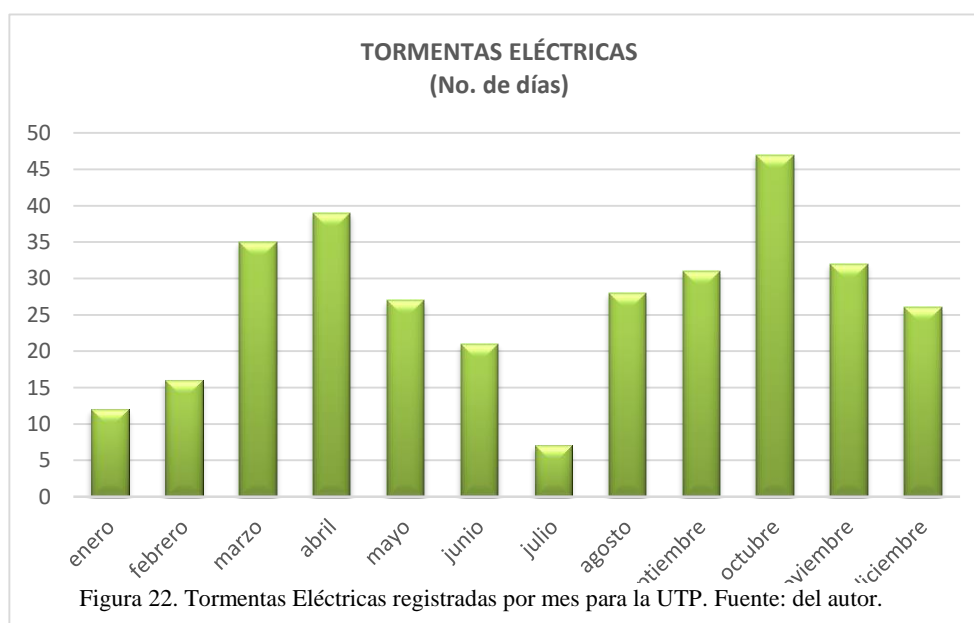
2009		2010		2011		2012		2013	
Enero	1	ENERO	1	ENERO	1	ENERO	0	ENERO	0
Febrero	0	FEBRERO	1	FEBRERO	3	FEBRERO	0	FEBRERO	4
Marzo	3	Marzo	0	Marzo	3	Marzo	4	Marzo	2
Abril	0	Abril	0	Abril	4	Abril	2	Abril	2
Mayo	3	Mayo	2	Mayo	1	Mayo	1	Mayo	0
Junio	0	Junio	0	Junio	1	Junio	1	Junio	3
Julio	0	Julio	0	Julio	0	Julio	2	Julio	1
Agosto	0	Agosto	2	Agosto	4	Agosto	2	Agosto	3
Septiembre	0	Septiembre	3	Septiembre	1	Septiembre	5	Septiembre	8
Octubre	4	Octubre	5	Octubre	1	Octubre	4	Octubre	7
Noviembre	3	Noviembre	1	Noviembre	1	Noviembre	2	Noviembre	5
Diciembre	3	Diciembre	1	Diciembre	3	Diciembre	1	Diciembre	2

2014		2015		2016		2017		2018	
Enero	2	Enero	0	Enero	0	Enero	1	Enero	4
Febrero	0	Febrero	4	Febrero	2	Febrero	0	Febrero	2
Marzo	4	Marzo	2	Marzo	3	Marzo	7	Marzo	4
Abril	6	Abril	8	Abril	4	Abril	9	Abril	3
Mayo	5	Mayo	4	Mayo	3	Mayo	1	Mayo	4
Junio	0	Junio	1	Junio	3	Junio	2	Junio	8

Julio	0	Julio	0	Julio	1	Julio	1	Julio	2
Agosto	1	Agosto	4	Agosto	4	Agosto	4	Agosto	2
Septiembre	0	Septiembre	2	Septiembre	2	Septiembre	2	Septiembre	6
Octubre	4	Octubre	6	Octubre	4	Octubre	1	Octubre	7
Noviembre	1	Noviembre	2	Noviembre	4	Noviembre	2	Noviembre	8
Diciembre	0	Diciembre	4	Diciembre	2	Diciembre	2	Diciembre	5

Tabla 6. Eventos reportados por mes durante los últimos 10 años con incidencia sobre el campus de la universidad y sus alrededores. Fuente: del autor

De la información anterior se tiene la gráfica 22. que permite relacionar la cantidad de eventos registrados por mes, de donde se puede concluir, que la agrupación de los datos, muestran una similitud con las figuras 20 y 21, dejando en evidencia los meses de mayor y menor incidencia, meses en los cuales la temporada de lluvias en la región concuerdan con lo registrado.



5.4 CALCULO DEL RIESGO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN CAMPOS ABIERTOS DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

En la actualidad las normas existentes y los sistemas de protección tienen como finalidad proteger a los edificios contra descargas atmosféricas directas, así como los efectos y repercusiones de las corrientes de rayo inducidas y la posible probabilidad de fuego. Sin embargo, la norma IEC 62305-2 plantea el cálculo del

riesgo de pérdida de vidas humanas y/o lesiones permanentes por medio de una ecuación que tiene en cuenta a las personas que se encuentren por fuera de una estructura.

$$R_1 = DDT * A_d * C_d * P_A * \left(\frac{n_p}{n_t}\right) * \left(\frac{t_p}{t_t}\right) \quad (1)$$

Dónde:

DDT: Densidad de descargas a tierra [rayos=km²/ año].

A_d: Área del elemento que se desea proteger [km²].

C_d: Factor que toma en cuenta la localización relativa del elemento que se desea proteger (Ver Tabla 7).

PA: Probabilidad de lesiones a seres vivos a causa de tensiones de paso y de contacto. (ver Tabla 8).

np: Número posible de personas en peligro.

nt: Número total de personas esperadas en la estructura.

tp: Tiempo en horas al año de permanencia de las personas en el lugar peligroso [h/año].

tt: Número total de horas al año [h/año]

El producto $ND = DDT * A_d * C_d$ es el promedio anual de eventos peligrosos que pueden causar daño sobre la estructura que se desea proteger. P_1 es la probabilidad de que un evento peligroso pueda causar daño a los seres vivos. El producto $L_1 = n_p/n_t * t_p/t_t$ es la pérdida consecuente (en este caso seres vivos) del daño causado por un evento peligroso. Por lo tanto, la ecuación general para el riesgo de pérdida de vidas humanas por tensiones de paso y de contacto para personas que están fuera de la estructura es $R_1 = N_D * P_1 * L_1$.

Localización relativa	C _d
Elemento rodeado de objetos o _arboles más altos	0.25
Elemento rodeado de objetos o _arboles de igual altura o menor	0.5
Elemento aislado: sin objetos en la vecindad	1
Elemento aislado: en la cima de una colina o elevación	2

Tabla 7. Factor de localización C_d

Medidas de Protección	P1
Sin medidas de protección	1
Aislamiento eléctrico de bajantes expuestas	10-2
Equipotencialización efectiva del suelo	10-2
Avisos de advertencia	10-1

Tabla 8. Valores de P₁

6.1 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS ZONAS DEPORTIVAS EN LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA



62

6.2.1 Cancha de césped natural.

Inicialmente se tiene la cancha principal de Futbol, escenario no cubierto que se encuentra ubicado en la zona sur del campus con medidas de 96mx70m, además se encuentra rodeado por sendero del jardín botánico, en el 80% la zona se encuentra descubierta y con bajos edificios. Se tienen diferentes usos, desde la práctica de futbol, rugby y lacrosse, hasta ultimate, atletismo, actividades de campo y práctica. En los alrededores de la cancha se tiene la pista atlética que tiene 400mx6m.

- Área aproxima de la cancha de césped: 6.720 m²

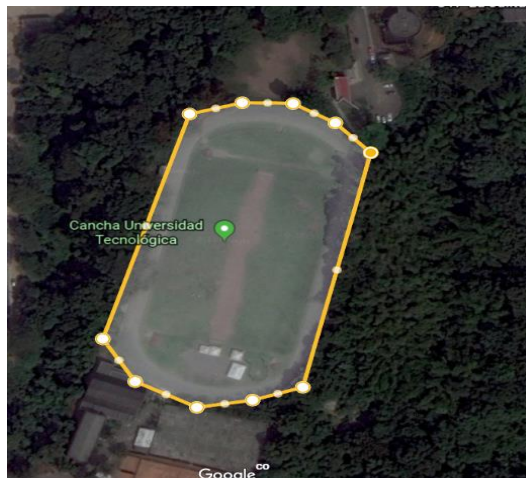


Figura 24. Área aproximada cancha de césped, imagen obtenida de google maps.

- Área aproximada descubierta que rodea la cancha de césped: 94.000 m²



Figura 25. Área aproximada descubierta que rodea la cancha de césped, imagen obtenida de google maps.

- Tiempo de disponibilidad: lunes a Domingo de 6:00 am a 6:00 pm

6.2.2 Cancha de Tenis y muro de Tenis.

La cancha de Tenis y el muro de tenis es un escenario no cubierto que se encuentra ubicado en la zona norte del campus rodeado por la zona boscosa del jardín botánico, cuenta con medidas de 23.77m x 10.97 m. En el lugar se realizan las actividades de tipo académicos y torneos.

- Área aproxima de la cancha de tenis: 260.7569 m²

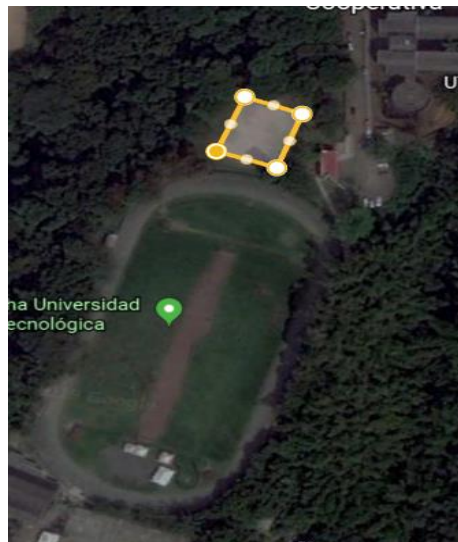


Figura 26. Área aproxima de la cancha de tenis, imagen obtenida de google maps.

- Área aproximada descubierta que rodea la cancha de tenis: 94.000 m²

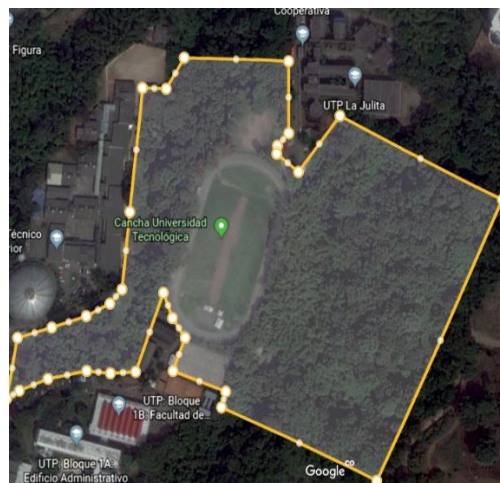


Figura 27. Área aproximada descubierta que rodea la cancha, imagen obtenida de google maps.

- Tiempo de disponibilidad: lunes a viernes de 6:00 am a 9:00 pm.

6.2.3 Canchas de fútbol sintética.

La cancha de futbol sintética es un escenario no cubierto que se encuentra ubicado en la zona norte del campus, tiene medidas de 90m por 45m. Se encuentra rodeado en la parte posterior de zona boscosa y el 80% del terreno se encuentra a cielo descubierto, además no se encuentran edificaciones con gran altura ya que en esta zona solo hay espacios deportivos y el parqueadero

- Área de la cancha sintética: 4.050 m²

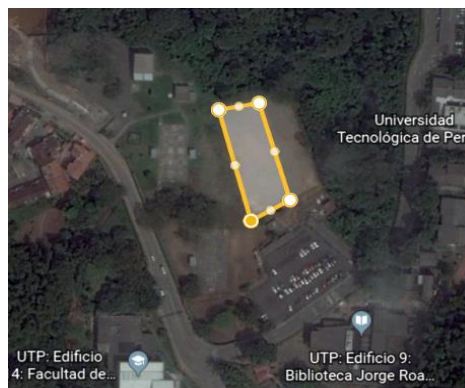


Figura 28. Área de la cancha sintética, imagen obtenida de google maps.

- Área aproximada descubierta que rodea la cancha de tenis: 70.250 m²



Figura 29. Área aproximada descubierta que rodea la cancha de tenis, imagen obtenida de google maps.

- Tiempo de disponibilidad: lunes a viernes de 6:00 am a 9:00 pm

6.2.4 Cancha de Volley Arena.

La cancha de Volley Arena se encuentra alrededor de las canchas de futbol sintéticas, con medidas de 20.60m x 12.20m, a campo abierto. Este espacio se encuentra disponible y abierto al público de lunes a viernes de 6am hasta las 10pm, sábados, domingos y festivos de 12m a 10pm.

- Área de la cancha de Volley Arena: 251.32 m²



Figura 30. Área cancha Volley Arena, imagen obtenida de google maps.

- Área aproximada descubierta que rodea la cancha de Volley Arena: 94.000 m²

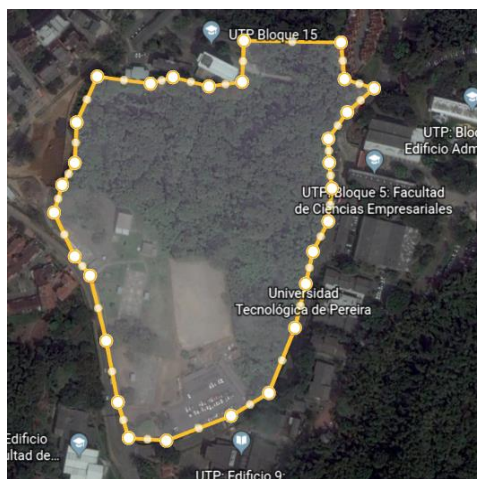


Figura 31. Área aproximada descubierta que rodea la cancha de Volley Arena, imagen obtenida de google maps.

- Tiempo de disponibilidad: lunes a viernes de 6:00 am a 6:00 pm

6.2.5 Piscinas Semiolímpicas

Uno de los más importantes proyectos implementado en los últimos meses por la universidad ha sido las piscinas semi olímpicas, que se encuentran cercanas a la cancha de futbol principal y rodeada por el jardín botánico. El escenario no cubierto cuenta con medidas de 21m x 25m y 18m x 10.60m. En el lugar se practican las actividades académicas.

- Áreas de las piscinas: 1.843 m²



Figura 32. Área de las piscinas, imagen obtenida de google maps.

- Área aproximada descubierta que rodea las piscinas: 94.000 m²

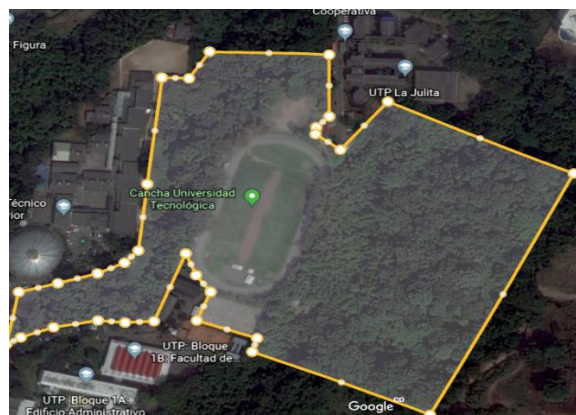


Figura 33. Área aproximada descubierta que rodea las piscinas, imagen obtenida de google maps.

- Tiempo de disponibilidad: lunes a viernes de 6:00 am a 6:00 pm

6.2.6 Canchas de fútbol sala

Se tienen las canchas de futbol sala que se encuentran en la misma zona de la cancha sintética, estas también a campo abierto que cuentan con una medida de 26.25m x 17m y 18m x 19m. En estas canchas se practica, futbol sala, voleibol, baloncesto y algunas actividades al aire libre.

En promedio se puede encontrar 8 personas haciendo uso de cada cancha.

- Área de la cancha de fútbol sala #1: 446.25 m²



Figura 34. Área de la cancha de fútbol sala #1, imagen obtenida de google maps.

- Área aproximada descubierta que rodea la cancha de fútbol sala #1: 94.000 m²



Figura 35. Área aproximada descubierta que rodea la cancha de fútbol sala #1, imagen obtenida de google maps.

- Tiempo de disponibilidad: lunes a viernes de 6:00 am a 6:00 pm
- Área de la cancha #2: 342 m²



Figura 36. Área de la cancha de fútbol sala #2, imagen obtenida de google maps.

- Área aproximada descubierta que rodea la cancha de fútbol sala #2: 94.000 m²

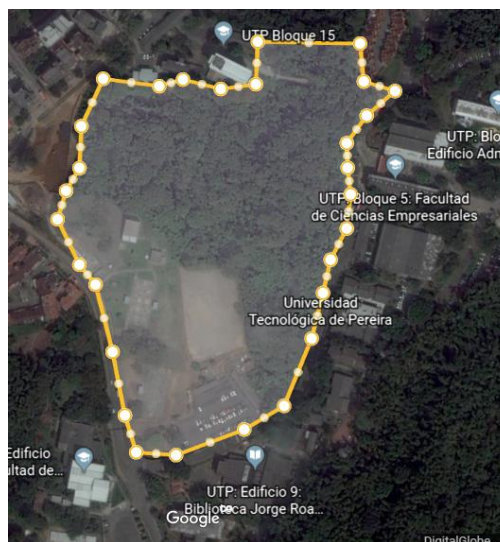


Figura 37. Área aproximada descubierta que rodea la cancha de fútbol sala #1, imagen obtenida de google maps.

- Tiempo de disponibilidad: lunes a viernes de 6:00 am a 6:00 pm

6.2.7 Zonas de entrenamiento al aire libre

Finalmente se tienen 2 áreas de entrenamiento al aire libre, que cuenta con estructuras expuestas al ambiente, tiene medidas aproximadas de 6m x 8m. En estos espacios se practican torneos internos y se encuentra disponible para todo el público.

- Área: 48 m²



Figura 38. Área aproximada zona de entrenamiento al aire libre, imagen obtenida de google maps.

- Área aproximada descubierta que rodea la zona de entrenamiento: 94.000 m²

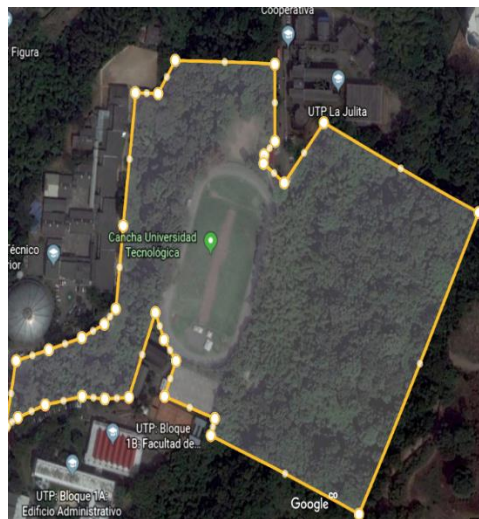


Figura 39. Área aproximada descubierta que rodea la zona de entrenamiento, imagen obtenida de google maps.

- Tiempo de disponibilidad: lunes a viernes de 6:00 am a 9:00 pm

6.2 ANÁLISIS DEL RIESGO PARA CADA ZONA DEPORTIVA

Aplicando la ecuación 1.0 se calculará el riesgo (R_1) dependiendo las características de cada zona deportiva de la Universidad, además se tiene en cuenta los datos tomados de la tabla 1. “Densidad de descargas a tierra para las principales ciudades de Colombia de descargas a tierra para la ciudad de Pereira”, el tiempo de disponibilidad de cada zona y se tomará este como el tiempo t_t y la capacidad de cada zona deportiva.

La finalidad es poder determinar si el riesgo obtenido, es tolerable o no, partiendo de que la norma IEC 62305-2 define el valor tolerable en $R_T = 1 \times 10^{-5}$.

6.2.1 Caso: Cancha principal de Futbol

Tomando como base los datos del sistema de estadísticas de la Universidad Tecnológica de Pereira, se tiene que entre las actividades de tipo competitivo, formativo y recreativo que se realizan en la cancha de Futbol y en la pista atlética, se tiene un promedio de lunes a domingo de 30 personas, estas realizan actividades como Rugby, Lacrosse y Atletismo entre otras. Este promedio tiene en cuenta las personas externas a la universidad que utilizan el campus los fines de semana para actividades deportivas.

La capacidad de esta zona deportiva para albergar un número de personas en determinado tiempo que se esté realizando una actividad es de 130. Considerando que cada gradería tiene una capacidad de 45 personas y se cuentan dos de estas, y la cancha de futbol al jugarse un partido de cualquier a las actividades anteriormente mencionadas se tiene un promedio de 40 participantes.

Variables	Valor
DDT	4
Ad (km ²)	0.00672

Cd	0.25
P1	10-1
np	30
nt	130
tp (h/año)	4380
tt (h/año)	8760

Tabla 9. Variables para calcular el riesgo para cancha principal de fútbol

Con los datos obtenidos anteriormente se aplica la ecuación (1) de donde se obtiene:

$$R_1 = 4 * 0.00672 * 0.25 * 10^{-1} * \left(\frac{30}{130}\right) * \left(\frac{4380}{8760}\right)$$

$$R_1 = 0.00007754$$

Teniendo en cuenta que el riesgo tolerable propuesto por la IEC 62305-2, es de un valor de $RT = 1 \times 10^{-5}$, se tiene que el valor del riesgo obtenido en esta área es mucho mayor a la permitida. Por tal motivo este riesgo no es tolerable.

6.2.3 Caso: Cancha de Tenis

Para esta zona se tiene que el máximo número de personas que se pueden encontrar en determinado momento es 4 ya que el número máximo de participantes por quipo es dos personas, por lo tanto, la capacidad está diseñada para 4 participantes.

Este espacio se encuentra disponible 15 horas al día por 5 días a la semana, por lo tanto, se tiene un promedio de 10.7143 horas al día.

Variables	Valor
DDT	4
Ad (km2)	0.0002607569
Cd	0.25
P1	1
np	4
nt	4
tp (h/año)	3911
tt (h/año)	8760

Tabla 10. Variables para calcular el riesgo para cancha principal de Tenis

Con los datos obtenidos anteriormente se aplica la ecuación (1) de donde se obtiene:

$$R_1 = 4 * 0.0002607569 * 0.25 * 1 * \left(\frac{4}{4}\right) * \left(\frac{3911}{8760}\right)$$

$$R_1 = 1.1641 \times 10^{-4}$$

Al revisar el riesgo tolerable que propone la norma, se tiene que el riesgo encontrado para esta zona deportiva es nuevamente mucho mayor que el riesgo tolerable permitido.

6.2.4 Caso: Cancha de Futbol sintética

De la base de datos se tiene que en promedio 22 personas se encuentran en esta zona deportiva. Esta zona tiene una disponibilidad de lunes a viernes 15 horas cada día, lo que implica que en promedio se tiene un total de 10.71428 horas al día por

semana de disponibilidad.

Este espacio se encuentra diseñado para ser dividido en #4 canchas de futbol, que tiene capacidad cada una de 14 personas, por lo tanto, se tiene en total que la capacidad de esta zona deportiva es de 42 personas.

Variables	Valor
DDT	4
Ad (km2)	0.00405
Cd	0.25
P1	1
np	22
nt	42
tp (h/año)	3911
tt (h/año)	8760

Tabla 11. Variables para calcular el riesgo para cancha de futbol sintética.

$$R_1 = 4 * 0.00405 * 0.25 * 1 * \left(\frac{22}{42}\right) * \left(\frac{3911}{8760}\right)$$

$$R_1 = 9.47135 \times 10^{-4}$$

El riesgo obtenido es mucho mayor que el permitido.

6.2.5 Caso: Cancha de Volley Arena

La cancha cuenta con una capacidad para ser jugada con un máximo de 3 personas por equipo, aunque de manera recreativa se permite un máximo de 4 jugadores por equipo en el campo de juego. Esto significa que en promedio 3 personas se pueden encontrar en la zona la mayor parte del tiempo.

Maneja una disponibilidad de 15 horas diarias de lunes a viernes y 5 horas los días sábados, domingos y festivos, de tal manera que el promedio de uso diario se encuentra en 12.4285 horas.

Variables	Valor
DDT	4
Ad (km2)	0.00025132
Cd	0.25
P1	1
np	3
nt	4
tp (h/año)	4536
tt (h/año)	8760

Tabla 12. Variables para calcular el riesgo para cancha de Volley Arena.

Con los datos obtenidos anteriormente se aplica la ecuación (1) de donde se obtiene:

$$R_1 = 4 * 0.00025132 * 0.25 * 1 * \left(\frac{3}{4}\right) * \left(\frac{4536}{8760}\right)$$

$$R_1 = 9.76016 \times 10^{-5}$$

El valor obtenido nuevamente supera el valor tolerable que establece la IEC 62305-2.

6.2.6 Caso: Piscinas Semi-olímpicas

Esta zona se encuentra con dos piscinas semi-olímpica, de las cuales cada una de ella se encuentra diseñada para 7 y 4 carriles, lo que quiere decir que en total se tienen 11 personas que podrían estar en este espacio al mismo tiempo en una competencia. También se tiene que en las clases de deportes en donde se escoge esta disciplina, los grupos se encuentran compuestos con un promedio de 18 estudiantes, lo que significa que, en horarios formativos, se puede encontrar esta cantidad de personas al mismo tiempo en las piscinas.

Para las piscinas se maneja una disponibilidad de 6:00am hasta las 6:00 pm. Con lo anterior se tiene que en promedio 8.57h al día, contando de lunes a Domingo el uso de este espacio deportivo.

Variables	Valor
DDT	4
Ad (km2)	0.0007158
Cd	0.25
P1	10-1
np	18
nt	11
tp (h/año)	3128
tt (h/año)	8760

Tabla 13. Variables para calcular el riesgo para las piscinas semiolímpicas.

$$R_1 = 4 * 0.0007158 * 0.25 * 10^{-1} * \left(\frac{18}{11}\right) * \left(\frac{3128}{8760}\right)$$

$$R_1 = 1.67 \times 10^{-5}$$

Se determina que las condiciones de este espacio deportivo no cumplen con la

medida establecida.

6.2.7 Caso: Canchas de futbol sala

Para las canchas sintéticas se tiene que cada una de estas se encuentra diseñada para un total de 12 personas, pero en promedio se pueden encontrar 8 personas en cada una de estas ejerciendo cualquier actividad deportiva o de entretenimiento. Estas canchas tienen una disponibilidad de lunes a sábado de 7:00 am hasta las 9:00 pm, los días sábados se encuentran disponibles de 8:00 am hasta 12:00m.

En promedio se tiene que 12.5714 horas se encuentra en uso cada una de estas zonas.

Evaluando para la primera cancha se tiene:

Variables	Valor
DDT	4
Ad (km2)	0.00044
Cd	0.25
P1	1
np	8
nt	12
tp (h/año)	4588
tt (h/año)	8760

Tabla 14. Variables para calcular el riesgo para la cancha de fútbol sala #1.

Evaluando el riesgo se tiene:

$$R_1 = 4 * 0.00048 * 0.25 * 1 * \left(\frac{8}{12}\right) * \left(\frac{4588}{8760}\right)$$

$$R_1 = 1.67x 10^{-4}$$

Donde el riesgo obtenido es mucho mayor que el tolerable.

Para la segunda cancha se tiene que:

Variables	Valor
DDT	4
Ad (km2)	0.000342
Cd	0.25
P1	1
np	8
nt	12
tp (h/año)	4588
tt (h/año)	8760

Tabla 15. Variables para calcular el riesgo para la cancha de fútbol sala #2

Evaluando el riesgo se tiene:

$$R_1 = 4 * 0.000342 * 0.25 * 1 * \left(\frac{8}{12}\right) * \left(\frac{4588}{8760}\right)$$

$$R_1 = 3.42 \times 10^{-4}$$

Para este caso nuevamente se obtiene que el riesgo calculado es mucho mayor al riesgo tolerable.

6.2.8 Caso: Zonas de entrenamiento al aire libre

Estas zonas se encuentran diseñadas para una capacidad de 8 personas, pero en promedio se tiene 5 personas de lunes a domingo. Estas zonas se encuentran disponibles 15 horas de lunes a sábado, el día domingo se tiene disponibilidad de 6:00 am hasta 2:00 pm.

Con lo anterior se tiene que diariamente se tiene 14 horas promedio de uso.

Variables	Valor
DDT	4
Ad (km2)	0.000048
Cd	0.25
P1	1
np	5
nt	8
tp (h/año)	5110
tt (h/año)	8760

Tabla 16. Variables para calcular el riesgo para zonas de entrenamiento al aire libre.

$$R_1 = 4 * 0.000048 * 0.25 * 1 * \left(\frac{5}{8}\right) * \left(\frac{5110}{8760}\right)$$

$$R_1 = 1.75 \times 10^{-5}$$

Para el valor calculado se tiene que supera el riesgo tolerable establecido.

Con los datos obtenidos anteriormente de cada una de las ecuaciones en donde se evaluó el riesgo para cada zona deportiva, se obtiene que ninguno de los espacios se encuentra con un riesgo tolerable, situación que conduce a analizar el por qué ninguna de las áreas evaluadas cumple con el nivel del riesgo aceptado y cuál es la medida a implementar dependiendo las condiciones de cada zona deportiva.

La ecuación de riesgo para pérdida de vidas humanas y lesiones depende de tres factores primordiales, el área en la cual un rayo puede causar una fatalidad, la fracción del tiempo al cual las personas están expuestas al peligro y la densidad de descargas a tierra. En algunos de los casos se tomaron valores del tiempo de exposición relativamente altos, ya se evaluó el tiempo en el peor de los casos, tomando todas las horas en las que las zonas se encuentran hábiles para su uso, sin embargo, el riesgo R_1 es mayor al riesgo tolerable, esto se debe a que la densidad de descargas a tierra tiene un valor alto, y este parámetro no se puede modificar, ya que es un valor que depende de las condiciones geográficas y meteorológicas de cada región en particular.

7 SISTEMA MÁS ÓPTIMO A IMPLEMENTAR

El área de la Universidad Tecnológica de Pereira es el 60% descubierto, con campos al aire libre en donde la población estudiantil permanece gran parte del tiempo, sus actividades implican trabajos en el exterior, tanto académicos como recreativos, que llevan a que estudiantes, docentes, administrativos y personas del exterior se encuentren los siete días de la semana haciendo uso de las zonas a cielo descubierto. Con lo anterior se debe tener en cuenta que para que un lugar se encuentre debidamente protegido contra las tormentas eléctricas, se debe asegurar de proteger la infraestructura, los equipos y el personal. Para asegurar el buen estado de los equipos e infraestructura, es importante la aplicación de terminales de captación o pararrayos con sus respectivas puestas a tierra, pero para proteger a las personas que se encuentran realizando actividades al aire libre, como es el caso de estudio, se debe contar en primer lugar con un plan de emergencia para atender las descargas atmosféricas, el cual debe incluir las medidas a tomar antes, durante y después de la presencia de una tormenta o descarga atmosférica eléctrica, por tal motivo se hace necesario evaluar la necesidad de implementar un Sistema de Alerta Temprana (SAT). La norma NTC 4552 indica que el factor del riesgo es una herramienta que le suministra al diseñador de una protección, la magnitud del riesgo debido de un rayo que puede estar expuesta una instalación, sus ocupantes y lo equipos que se encuentren en el sitio evaluado. En cualquier caso, es responsabilidad del diseñador realizar las especificaciones de la instalación para una segura protección contra rayos; sin embargo, se dan las siguientes recomendaciones:

Riesgo	Recomendación
Bajo	Diseñar e implementar un sistema de protección interna y un sistema de puesta a tierra de acuerdo con las normas IEEE 1100, NTC 2050 y NTC 4552
Medio	Diseñar e implementar un sistema de protección externa, un sistema de protección interna y un sistema de puesta a tierra de acuerdo con las normas IEEE 1100, NTC 2050 y NTC 4552
Alto	Diseñar e implementar un sistema de protección interna y un sistema de puesta a tierra de acuerdo con las normas IEEE 1100, NTC 2050 y NTC 4552. Apantallamientos de equipos sensibles y estricto mantenimiento de protecciones internas cada vez que se presenten descargas de rayos directas o cercanas

Tabla 17. Recomendaciones norma NTC 4552 según el riesgo [11].

Además, también menciona que, para los sitios abiertos como estadios de fútbol, canchas de golf, centros recreacionales al aire libre o similares, donde el factor de riesgo sea medio o alto, se requiere aplicar el sistema de alarma.

Conociendo que el riesgo calculado para cada una de las zonas es alto, se es necesario tomar en cuenta lo sugerido en la NTC 4552, en donde es necesario realizar la aplicación de un sistema de alerta temprana para el campus de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Los sistemas de alerta temprana provisionan información oportuna y eficaz a través de instituciones identificadas, que permiten a las personas expuestas a una amenaza la toma de acciones para evitar o reducir su riesgo y su preparación para una respuesta efectiva. La norma europea EN50536, define un sistema de alarma temprana de tormenta como "un sistema compuesto por detectores de tormenta capaz de monitorearla y algoritmos para elaborar alertas válidas, relacionadas con eventos asociados al rayo, para un sitio a proteger específico", y es esta alerta temprana la que permite tomar acciones para minimizar el riesgo de incidentes por rayos.

Estos sistemas de alerta incluyen cuatro elementos, a tener en cuenta:

- Conocimiento y mapeo de amenazas
- Monitoreo y pronóstico de eventos inminentes
- Proceso y difusión de alertas comprensibles a las autoridades políticas y población
- Adopción de medidas apropiadas y oportunas en respuesta a tales alertas

Los primeros sistemas de alarma se basaron en la observación visual y auditiva de la tormenta, mediante la denominada regla 30/30. Esta regla consiste en generar una alarma si un trueno se escucha a menos de 30 segundos después de haber visto el relámpago de un rayo (destello luminoso) y se apaga si no se ha escuchado un trueno durante 30 minutos. Actualmente, las metodologías de alarma para detección temprana de tormentas están basadas en el monitoreo espacial y temporal de los impactos del rayo en tierra. La metodología más usada está basada en el método de las dos áreas: se escoge una zona interna, denominada zona de

interés (AOC por sus siglas en inglés), y otra externa, denominada zona de alarma (WA por sus siglas en inglés), teniendo en cuenta que dentro de esta área se encuentra la estructura o punto de interés (PI). Luego de tener las dos áreas, con el monitoreo espacio-temporal de los rayos nube-tierra, se emite una alarma si al menos un rayo impacta dentro de la zona.

Algunas metodologías más avanzadas que se han desarrollado en el grupo de investigación combinan más de un criterio para tomar la decisión de emitir la alarma; para esto hay que tener algoritmos de seguimiento de la tormenta y mediciones de campo eléctrico estático, entre otros criterios. Estos criterios ya son usados por empresas creadas en Colombia y que utilizan la información sobre los rayos.

7.1 NORMATIVA: IEC 62793 - 2016

En el año 2016 se publicó la normativa IEC 62793: 2016 de protección contra el rayo – sistema de avisos de tormenta, esta normativa es de carácter internacional al estar aprobada por la IEC [22].

Esta normativa explica la metodología a utilizar para la prevención frente al rayo, ya que enumera las diferentes maneras de detectar los posibles rayos que nos pueden afectar y estipula de qué manera podemos generar las alarmas preventivas.

La normativa diferencia entre las siguientes fases de la tormenta:

- Fase 1: Fase inicial, en esta fase es cuando se crea la tormenta y el campo electrostático sube considerablemente a nivel de tierra.
- Fase 2: Fase de crecimiento, esta fase se caracteriza por la aparición de los primeros rayos entre nubes. En algunos casos puede ocurrir que la descarga se produce entre nube y tierra.
- Fase 3: Fase de maduración, aparición de rayos frecuentes tanto entre nube-nube o nube-tierra.
- Fase 4: Fase de disipación, en esta fase los rayos van disminuyendo y el campo electrostático se reduce hasta los niveles normales del buen tiempo.

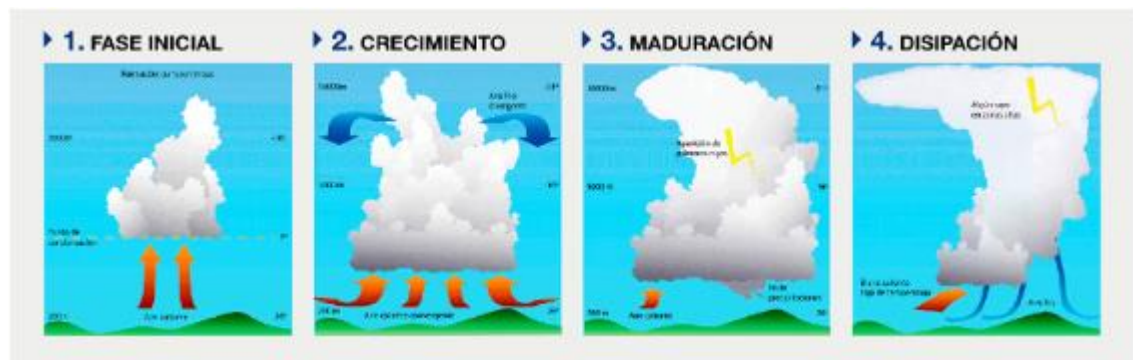


Figura 40. Fases De La Tormenta [22].

Según la normativa IEC 62793 - 2016 los dispositivos detectores de tormenta se clasifican por la fase que sean capaces de detectar:

Dispositivos de clase A: Detectan todo el ciclo de la tormenta, de la fase 1 a la 4.

Dispositivos de clase B: Detectan de la fase 2 a la fase 4. Por lo tanto, detectan todo tipo de rayos (nube-nube y nube-tierra)

Dispositivos de clase C: Detectan solo los rayos nube-tierra, donde la tormenta esta entre fase 3 y 4.

Dispositivos de clase D: Detectan rayos nube-nube y otras fuentes electromagnéticas con muy limitada eficiencia.

7.1.1 Métodos de alarma

La normativa también define los métodos de alarma en 3 pasos:

Definición de ares de alarma:

- Target area, área de extensión física donde el aviso es necesario.
- Monitoring area, es el área donde el aviso no es necesario, pero hay que tener precaución.
- Coverage area, es el área de cobertura del dispositivo de prevención

Activación de alarma:

- La normativa nos define diferentes activaciones según el uso que vayamos a realizar del dispositivo de detección.

Comunicación de la alarma:

- Una alarma y un procedimiento deben estar bien estipulados para garantizar la seguridad de las personas y maquinarias a proteger.

En la normativa IEC 62793:2016 hay diferentes anexos que nos explican cómo es el fenómeno del rayo, varios ejemplos de técnicas de detección de tormenta, así como de aplicación con diferentes sistemas de aviso [22].

8 CONCLUSIONES

- Según las estadísticas se tienen que para los meses de abril, septiembre y octubre se encuentran la mayor cantidad de reportes sobre lesiones a seres vivos, pero el mes de mayo es donde se tiene la mayor cantidad de personas afectadas.
- En el departamento de Antioquia es donde se encuentran la mayor cantidad de reportes que involucran lesiones a seres vivos y personas afectadas por los rayos, sin embargo, en la capital del país es donde se encuentra el mayor número de reportes que involucran lesiones a seres vivos por kilómetro cuadrado por año y el departamento de Guainía es el que tiene la tasa más alta de personas afectadas por millón de habitantes por año.
- Con los datos tomados desde el 2009 hasta el 2018, se puede observar que la ciudad de Pereira presenta un comportamiento activo de este fenómeno a lo largo del año, pero se intensifican en las temporadas de lluvias, gracias a su ubicación geográfica entre la Cordillera Central (región Andina) y el Valle del Cauca (región Pacífica), zonas donde los pisos térmicos varían constantemente, pasando de corrientes de aire cálidas a frías, producto de la cercanía al Nevado del Ruíz. Al cruzarse las dos corrientes se da un ambiente propicio que genera nubes para tormentas muy grandes.
- Según un estudio realizado por la CREG en el año 2015, la incidencia más alta de descargas eléctricas sobre las redes de distribución de energía en el país se presenta en la zona denominada Montaña centro 3: Risaralda, zona sur de Caldas y zona occidente de Quindío. Situación que se ve reflejada en los datos obtenidos en el intervalo de tiempo analizado (2008-2018).
- La incidencia más alta de descargas eléctricas sobre las redes de distribución de energía en el país se presenta en la zona denominada “Montaña centro 3” que comprende: Risaralda, zona sur de Caldas y zona occidente de Quindío.
- El riesgo tolerable propuesto por las normas IEC 62305 y NTC 4552 de (1×10^{-5}) , es un riesgo que puede ser adoptado para la evaluación en cualquier zona, pero para los casos específicos de campos abiertos aun aplicando el uso del SAT, puede que los resultados no estén por debajo de este valor tolerable, situación que no es la más deseada, pero aun así es una acción preventiva efectiva que

reduce el riesgo por descargas atmosféricas eléctricas para las personas que se encuentren al aire libre.

- Las personas que se encuentran al aire libre están expuestas a un nivel más alto de riesgo que aquellas que se encuentran en una estructura, por lo tanto, es pertinente caracterizar de forma correcta cada caso en particular, ya que variables como ubicación geográfica, las diferentes variables climatológicas, las actividades que se realizan en cada espacio y la cantidad de personas que pueden estar expuestas en cualquier momento, son las que permitirán realizar una elección correcta del tipo de protección contra rayos que se debe utilizar, además estas variables permiten determinar si es necesario o no el uso de un sistema de alarma de tormentas.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Torres, "El Rayo: Mitos, Leyendas, Ciencia y Tecnología," *Univ. Nac. Colomb.*, pp. 1–77, 2002.
- [2] H. Torres and D. Avila, "Hipótesis de Investigaciones sobre Variación Espacial y Temporal en los Parámetros del Rayo," *Metereología Colomb.*, vol. 2, pp. 1–6, 2000.
- [3] J. Montañá, J. B. Jané, B. H. Alameda, and U. P. de C. D. d'Enginyeria Elèctrica, *Estudio de la carga eléctrica asociada al rayo: caracterización de las tormentas en Cataluña*. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Elèctrica., 2004.
- [4] Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, *Meteorología y Climatología Semana de la Ciencia y la Tecnología*. 2004.
- [5] V. Cooray and I. of E. and Technology, *Lightning Protection*. Institution of Engineering and Technology, 2010.
- [6] F. Gonzales Molina, "Descripción física del rayo.," vol. capítulo 3, p. 120, 1993.
- [7] D. R. MacGorman, I. R. Apostolakopoulos, N. R. Lund, N. W. S. Demetriades, M. J. Murphy, and P. R. Krehbiel, "The Timing of Cloud-to-Ground Lightning Relative to Total Lightning Activity," *Mon. Weather Rev.*, vol. 139, no. 12, pp. 3871–3886, Jun. 2011.
- [8] H. Dieter and B. Ulrich, "Lightning : Principles."
- [9] Villa Garzon, Alvaro Alejandro, "Localización de tormentas eléctricas usando redes de sensores puntuales de campo electroestático.," 2016.
- [10] Pérez M. E. and García M. P., "Aplicaciones De La Teledetección En Degradación De Suelos," *Boletín la Asoc. Geógrafos Españoles*, 2013.
- [11] ICONTEC, "NTC 4552 - Protección contra rayos," *Ntc 4552*, vol. Primera Ac, no. 571, p. 45, 2004.
- [12] N. Review, K. T. Diabetes, G. E. Umpierrez, D. Smiley, and A. E. Kitabchi, "Annals of Internal Medicine Review," pp. 350–358, 2016.
- [13] R. Holle, *Recent studies of lightning safety and demographics*, vol. 3. 2013.

- [14] D. Aranguren et al., "Colombian Total Lightning Detection Network and early detection of failure risks for power systems," *Simp. Int. sobre Calid. la Energía Eléctrica (VII SICEL)*, pp. 1–6, 2013.
- [15] D. Aranguren et al., "Colombian Total Lightning Detection Network and early detection of failure risks for power systems," *Simp. Int. sobre Calid. la Energía Eléctrica (VII SICEL)*, pp. 1–6, 2013.
- [16] "Universidad Nacional de Córdoba FACULTAD DE CIENCIA EXACTAS FISICAS Y NATURALES INFORME TECNICO FINAL Práctica Supervisada ' Protección Contra Descargas Atmosféricas y Sistema de Puesta a Tierra de Protección ' - Coca-Cola Andina Argentina."
- [17] N. Ntc, "Normas técnicas sobre protección contra rayos y sus aplicaciones Normas nacionales sobre protección contra rayos," 1999.
- [18] B. Park and P. O. Box, "Nfpa 780," no. March, p. 74, 2008.
- [19] H. Torres, *Torres, H. Protección contra rayos – 2a Edición*. 2018.
- [20] N. Navarrete-Aldana, M. A. Cooper, and R. L. Holle, "Lightning fatalities in Colombia from 2000 to 2009," *2014 Int. Conf. Light. Prot. ICLP 2014*, pp. 40–46, 2014.
- [21] National Weather Service (2007). Lightning Safety. National Weather Service. Consultado el September 21 de; 2007.
- [22] UNIVERSIDAD DE LA SABANA El fenómeno de los rayos en Colombia disponible en página web: [<http://www.unisabana.edu.co/vida-del-campus/alerta-detormentas/secciones/el-fenomeno-de-los-rayos-en-colombia/>], consultada en junio de 2019.
- [23] INGESCO NORMATIVA: IEC 62793 - 2016N disponible en pagina web: [<https://www.ingesco.com/es/noticias/normativa-iec-62793-2016>], consultada en junio de 2019.
- [24] SISTEMAS DE PROTECCIÓN EXTERNOS disponible en pagina web: [https://www.colombia.generadordeprecios.info/obra_nueva/Instalaciones/Proteccion_contra_el_rayo/Sistemas_externos/IPE030_Pararrayos_con_dispositivo_de_cebad.html], consultada en enero de 2019.
- [25] IDEAM disponible en pagina web: [<http://www.ideam.gov.co/>], consultada en junio de 2019.

- [23] MAPA ESQUEMATICO UNIVERSIDAD TECNOLOGGICA DE PEREIRA, disponible en pagina web: [<https://www.utp.edu.co>], consultada en junio de 2019.